

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Diplomová práce

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

**Vlastnosti malt na bázi románského cementu s příměsí
průmyslových a stavebních odpadů**

**Properties of mortars based on of Roman cement with additions
of industrial and construction waste**

Student: Bc. Tomáš Kalus

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jana Daňková, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Kalus**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T021 Stavební hmoty a diagnostika staveb

Téma: **Vlastnosti malt na bázi románského cementu s příměsí průmyslových a stavebních odpadů**
Properties of mortars based on of Roman cement with additions of industrial and construction waste

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je ověření vybraných vlastností malt na bázi románského cementu, u nichž bude použito do záměsi odpadních materiálů.

Doporučená struktura práce:

1. Úvod.
2. Teoretická část: Shrnutí současných poznatků.
3. Experimentální část: Návrh receptury, laboratorní ověření vlastností čerstvých a ztvrdlých malt.
4. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

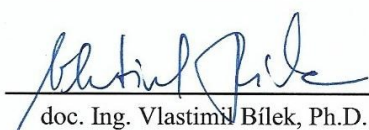
HOŠEK J. a LOSOS L.: Historické omítky. Praha: Grada Publishing a.s., 2007, s. 167. ISBN 8024713950.
Kolektiv autorů: Románský cement - historie, vlastnosti a možnosti použití. Zpravodaj STOP, svazek 13, č. 4. Praha: STOP, 2011, s. 60. ISSN 1212-4168.
Řada norem pro zkoušení malt ČSN EN 196
DELATTE, Norbert J. Lessons from Roman cement and concrete. Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice, 2001, 127.3: 109-115.
KLISIŇSKA-KOPACZ, Anna; TIŠLOVA, Renata. The effect of composition of Roman cement repair mortars on their salt crystallization resistance and adhesion. Procedia Engineering, 2013, 57: 565-571.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Daňková, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2017

Datum odevzdání: 30.11.2017


doc. Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Ve Lhotce27.11.2017.....

..........

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnutí licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Ve Lhotce 27. 11. 2017

..... Kalus

podpis studenta

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Janě Daňkové, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce a cenné rady, které mi při psaní pomohly. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Pavlovi Mecovi a Prof. Ing. Petrovi Martincovi, CSc. za pomoc při provádění laboratorních zkoušek.

Poděkování patří také Institutu čistých technologií těžby a užití energetických surovin (Projekt udržitelnosti, identifikační kód: LO1406) za bezplatné užívání klimatické komory a kalorimetru a také zaměstnancům Ústavu geoniky AV ČR, kteří mi byli nápomocni při provádění laboratorní analýzy.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá hydraulickým pojivem románský cement. Je zde popsán vývoj a vlastnosti tohoto historického pojiva. Pro jeho příznivé vlastnosti se v poslední době znovu používá, zejména při restaurování památek. Nevýhoda románského cementu je jeho vysoká cena na tuzemském trhu. V experimentální části této práce jsou zkoumány vlastnosti malt na bázi románského cementu s příměsí průmyslových a stavebních odpadů. Cílem práce je vyvinout maltu s co nejmenším množstvím románského cementu při dosažení co nejlepších vlastností. Vybrané vlastnosti byly ověřeny laboratorně.

Klíčová slova

Románský cement, popílek, cihlářská hlína, pevnost v tlaku, pevnost v tahu ohybem

Annotation

The thesis deals with hydraulic binder roman cement. It describes the development and properties of this historical binder. Recently, this binder is used again especially for restoring monuments. The disadvantage of roman cement is high price on the domestic market. In experimental part of this thesis, properties of mortars based on roman cement with admixture of industrial and construction waste are researched. The aim of the thesis was to develop a mortar with the smallest possible amount of roman cement at achievement of the best possible properties. Selected properties were verified in laboratory.

Key words

Roman cement, fly ash, crushed brick, compressive strength, flexural strength

Obsah diplomové práce

Seznam použitého značení	10
1. Úvod	12
2. Románský cement	14
2.1 Historie románského cementu	14
2.2 Výroba románského cementu	15
2.2.1 Příprava suroviny	15
2.2.2 Výpal suroviny pro výrobu románského cementu	17
2.3 Tuhnutí a tvrdnutí malt z románského cementu	18
2.4 Vlastnosti malt na bázi románského cementu	18
2.5 Prompt cement od firmy Vicat	20
2.5.1 Složení a výroba Prompt cementu	20
2.5.2 Využití Prompt cementu	21
2.6 Belitický cement	22
3. Malty	24
3.1 Pojiva do malty	24
3.2 Plniva do malty	24
3.3 Voda do malty	25
3.4 Přísady do malty	25
3.5 Příměsi do malty	26
3.5.1 Křemičitý úlet (mikrosilika)	26
3.5.2 Popílek	27
3.5.3 Cihlářská hlína	28
3.5.4 Barviva	29
4. Experimentální část	31
4.1 Výroba zkušebních těles	32
4.2 Stanovení konzistence čerstvé malty	34

4.2.1 Postup zkoušky.....	34
4.2.2 Vyjádření výsledků	35
4.3 Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty.....	36
4.3.1 Postup zkoušky.....	36
4.3.2 Vyjádření výsledků	37
4.4 Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé maltě.....	37
4.4.1 Postup zkoušky.....	37
4.4.2 Vyjádření výsledků	38
4.5 Stanovení počátku tuhnutí čerstvé malty	39
4.5.1 Postup zkoušky.....	39
4.5.2 Vyjádření výsledků	40
4.6 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu.....	41
4.6.1 Postup zkoušky.....	41
4.6.2 Vyjádření výsledků	42
4.6.3 Porovnání pevnosti v tahu za ohybu	44
4.7 Stanovení pevnosti v tlaku	47
4.7.1 Postup zkoušky.....	47
4.7.2 Vyjádření výsledků	48
4.7.3 Porovnání pevnosti v tlaku.....	50
4.8 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé malty	53
4.8.1 Postup zkoušky.....	53
4.8.2 Vyjádření výsledků	53
4.8.3 Porovnání objemové hmotnosti ztvrdlé malty	55
4.9 Stanovení nasákavosti	56
4.9.1 Postup zkoušky.....	56
4.9.2 Vyjádření výsledků.....	57
4.10 Zkoušení pigmentu	58
4.10.1 Postup zkoušky.....	58

4.10.2 Vyjádření výsledků	59
4.10.3 Porovnání pevností malt s přídavkem pigmentu	60
4.11 Metodika analýzy vzorků	61
4.11.1 Rozsah použitých analýz	61
4.11.2 Makroskopický popis vzorků a reakce s HCl	63
4.11.3 Fotodokumentace	63
4.11.4 Metoda infračervená spektrometrie	63
4.11.5 Metoda stanovení hodnoty pH ve vodném výluhu	64
4.11.6 Metoda stanovení hydratačního tepla - kalorimetrie	64
4.12 Výsledky analýzy vzorků	64
4.12.1 Makroskopický popis a reakce s 5% roztokem HCl	64
4.12.2 Fotodokumentace a optická mikroskopie	65
4.12.3 Infračervená spektra jednotlivých vzorků	72
4.12.4 Stanovení hodnoty pH	73
4.12.5 Kalorimetrie	73
5. Závěr	75
6. Seznamy	77
6.1 Seznam literárních a internetových zdrojů	77
6.2 Seznam tabulek	80
6.3 Seznam obrázků	81
6.4 Seznam grafů	83
6.5 Seznam příloh	83
7. Přílohy	84

Seznam použitého značení

Al_2O_3	oxid hlinitý
<i>apod.</i>	a podobně
b	šířka zkušebního tělesa [mm]
$^{\circ}C$	stupeň Celsia
$CaCO_3$	uhličitan vápenatý (kalcit)
CaO	oxid vápenatý (volné vápno)
$Ca(OH)_2$	hydroxid vápenatý (portlandit)
$CaSO_4$	síran vápenatý (anhydrit)
C_3A	trikalciumaluminát (amorfní fáze)
$C_{12}A_7$	dodekakalciumheptaaluminát
C_4AF	tetrakalciumaluminátferit (celit)
C_4A_3S	tetrakalciumtrialuminátsilikát
C_2S	dikalciumsilikát (belit)
C_3S	trikalciumsilikát (alit)
ČSN	Česká technická norma
d	výška zkušebního tělesa [mm]
EN	Evropská norma
F	zatížení [N]
f	pevnost v tahu ohybem [N/mm ²]
f_7	pevnost v tahu ohybem po 7 dnech [N/mm ²]
f_{28}	pevnost v tahu ohybem po 28 dnech [N/mm ²]
f_{56}	pevnost v tahu ohybem po 56 dnech [N/mm ²]
F_{max}	maximální zatížení zkušebního tělesa [N]
f_t	pevnost v tlaku [N/mm ²]

f_{t7}	pevnost v tlaku po 7 dnech [N/mm ²]
f_{t28}	pevnost v tlaku po 28 dnech [N/mm ²]
f_{t56}	pevnost v tlaku po 6 dnech [N/mm ²]
Fe_2O_3	oxid železitý
K_2O	oxid draselný
l	vzdálenost mezi středy podpěr [mm]
m	hmotnost zkušebního tělesa [g]
MgO	oxid hořečnatý (periklas)
M_A	hlinitanový modul
M_h	hydraulický modul
M_s	silikátový (křemičitanový) modul
min	minuta
n	počet vzorků [-]
Na_2O	oxid sodný
$např.$	například
$obr.$	obrázek
s	sekunda
SiO_2	oxid křemičitý
SO_3	oxid sírový
$Tab.$	tabulka
V_v	objem měřicí nádoby [dm ³]
ρ	hustota [kg/m ³]

1. Úvod

Románský cement je historické hydraulické pojivo, připravené vypálením vápence bohatého na jílové minerály. Jeho výroba se od soudobých cementů liší zejména nízkou teplotou výpalu, kdy pálení probíhá při teplotách pod 1200 °C. Vyniká svými příznivými vlastnostmi, jako je vysoká pevnost a odolnost proti atmosférickým vlivům, dále vysoká porozita a propustnost pro vodní páry. Typická je jeho okrová až hnědá barva, která imituje kamenný vzhled a umožňuje ponechat prvky fasády bez barevného nátěru.

Románský cement zmizel jako materiál se změnou architektury fasád po první světové válce. Po dlouhá desetiletí se restaurování fasád a ozdobných prvků z románského cementu provádělo nevhodnými materiály, jako např. sádkou, kterou je možno dosáhnout obdobného vzhledu, ale nikoli trvanlivosti; vápennou maltou, která neodolává povětrnosti nebo portlandským cementem, jehož vysoká pevnost a tvrdost vede k poškození původních prvků fasád.

Pro příznivé vlastnosti se románský cement v poslední době znovu používá při restaurování památek. Obnovení výroby napomohly projekty ROCARE a ROCEM financované z fondů EU, které v rámci svých výzkumných projektů zjišťovaly unikátní vlastnosti těchto cementů.

Diplomová práce je rozdělená na dvě části. Teoretická část se zabývá vývojem, výrobou a vlastnostmi románského cementu na základě získaných faktů z dostupných odborných publikací, které se zabývají touto problematikou. Jsou zde také shrnuty informace o v této práci testovaném produktu Prompt (přírodní románský cement) od firmy Vicat. Nachází se zde také shrnutí poznatků o průmyslových a stavebních odpadech, které často nacházejí ve stavebnictví uplatnění při výrobě malt.

Úkolem experimentální části této práce je vypořádání se s největší nevýhodou románského cementu, což je velmi vysoká cena. Cena se dá snížit vytvořením malty s co nejmenším možným množstvím románského cementu. Nesmí se však snížit požadovaná kvalita vzniklé malty, proto jako náhrada za románský cement jsou přidávány do malt příměsi v podobě průmyslových a stavebních odpadů. Jako testované příměsi byly použity: elektrárenský popílek z odlučovačů z elektrárny Dětmárovice, antuka a cihlářská hlína vypálená na 600 °C a 850 °C z cihelny Bratronice. Jako pojivo byl použit již zmíněný Prompt cement od firmy Vicat.

Na maltách byly ověřeny vybrané vlastnosti. Na čerstvé maltě byla stanovena konzistence rozlitím, objemová hmotnost, obsah vzduchu a počátek a konec doby tuhnutí. Na vzorcích ztvrdlé malty byla stanovena pevnost v tahu ohybem, pevnost v tlaku, objemová hmotnost po 7, 28 a 56 dnech a nasákavost.

Na závěr byla experimentálně ověřena záměs malty s použitím příměsi komerčního anorganického červeného pigmentu na bázi oxidů železa. Tato záměs může být, hypoteticky, použita jako sanační hmota pro neomítané režné zdivo. Lze také předpokládat, že pigmenty na bázi oxidů železa se v tomto případě uplatňují při hydratačních procesech. Tímto byla také zkoumána kompatibilita anorganických pigmentů na bázi oxidů železa s ostatními složkami této maltové záměsi.

2. Románský cement

Románský cement je hydraulické pojivo, připravené vypálením vápence bohatého na jílové minerály. Od jiných hydraulických materiálů, jako je portlandský cement nebo hydraulické vápno, se románský cement liší velmi krátkou dobou tuhnutí, proto byl v minulosti tak oblíbený při tvorbě jemných detailů a napojení přímo na fasádě (Obr. 1). Další důležitou vlastností je vysoká odolnost proti větru. Často se na fasádách z devatenáctého století uchovaly dodnes pouze ozdoby z románského cementu. K tomu napomáhá také nepatrné smrštění při tuhnutí, a proto i dobrá přídržnost k podkladu. Typická je jeho okrová až hnědá barva, která imituje kamenný vzhled a umožňuje ponechat prvky fasády bez barevného nátěru.



Obr. 1: Fasáda domu restaurovaná maltou pojenou románským cementem [20]

2.1 Historie románského cementu

Románský cement byl patentován v roce 1796 Jamesem Parkem v Anglii. Tento cement byl původně pojmenován jako tzv. Parkerův cement, postupně se však rozšířil do celé Evropy pod názvem románský cement. Jeho název měl evokovat pevnost římských cementů a jejich trvanlivost. První cementárny vznikaly již od počátku 19. století ve Velké Británii a Francii. Později se výroba rozšířila do Německa a dále na východ na území Rakousko-Uherské monarchie. Zde vznikla v roce 1846 továrna na románský cement v Kufsteinu v Tyrolsku. Zdejší produkt, pro který se vžil název „Kufstein“, vynikal svojí kvalitou,

kteřá byla oceněna řadou medailí a diplomů na evropské úrovni. Po zbytek 19. století byl dominantním materiálem pro zhotovování štukových ozdob historizujících a secesních fasád, ať již dusaných, tažených nebo omítaných a na místě tvarovaných [10,33].

Na území Čech a Moravy se výroba románského cementu objevila teprve v 70. letech 19. století. Jejich význam byl ale spíše lokální. Většina z těchto cementáren se specializovala spíše na jiné produkty, jako je hydraulické vápno a později také portlandský cement. Románský cement patřil pouze mezi doplňkovou výrobu a zmizel jako materiál se změnou architektury fasád po první světové válce [10].

Po dlouhá desetiletí se restaurování fasád a ozdobných prvků z románského cementu provádělo nevhodnými materiály:

- **sádrrou**, kterou je možno dosáhnout obdobného vzhledu, ale nikoli trvanlivosti
- **vápennou maltou**, která neodolává povětrnosti a mrazu
- **portlandským cementem**, jehož vysoká pevnost a tvrdost vede k poškození původních prvků fasád.

Díky obnovení výroby v posledních letech se na trh dostal materiál, který fyzikálně, chemicky i vzhledově odpovídá opravovaným prvkům. Obnovení výroby napomohly projekty ROCARE a ROCEM financované z fondů EU, které v rámci svých výzkumných projektů zjišťovaly unikátní vlastnosti těchto cementů [10].

2.2 Výroba románského cementu

Románské cementy patří do skupiny přírodních hydraulických pojiv, které se začaly vyrábět v 19. století, jako alternativa ke klasickým stavebním materiálům jako jsou kámen, cihla nebo sádra. Tato pojiva byla připravována pálením přírodních surovin, které měly optimální složení vzhledem k hydraulickým vlastnostem výsledné maltoviny. V dávných dobách existovalo jiné pojivo, tzv. římský cement, jehož hydraulické vlastnosti byly docíleny přidávkem hlíny nebo přísad sopečného původu, jako jsou tuffy nebo trass. Naopak hydraulické vlastnosti románských cementů jsou dány složením suroviny a podmínkami výpalu [33].

2.2.1 Příprava suroviny

Hlavní surovinou pro výrobu románského cementu jsou vápenaté či dolomitické slíny, které obsahují vysoké množství jílových minerálů, jež jsou zdrojem Al_2O_3 (oxid hlinitý), Fe_2O_3 (oxid železitý) a SiO_2 (oxid křemičitý). Právě díky obsahu těchto oxidů dochází

ke vzniku cementových fází, které mají po stmelení hydraulické vlastnosti [10]. Slíny by neměly obsahovat větší množství MgO (oxid hořečnatý), protože způsobuje rozpínání cementu po ztuhnutí. Množství MgO ve slínu by mělo být maximálně 6% [14].

Nejvýhodnější surovinou pro výrobu románského cementu je vápenec, který již v ložisku obsahuje hydraulické oxidy Al_2O_3 , Fe_2O_3 a SiO_2 . Pokud nejsou tyto zmíněné hydraulické oxidy v žádaném poměru k CaO, je třeba složení suroviny k výrobě slínku korigovat vnesením některých z přísad obsahujících požadované oxidy, např. bauxit (Al_2O_3). Románský cement je však přírodní pojivo, proto by se mělo vyrábět pouze z přírodních slínů bez těchto přísad. Poměr hydraulických oxidů k CaO, případně také MgO, se označuje jako hydraulický modul (1):

$$M_H = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (1)$$

Dle hodnoty hydraulického modulu rozlišujeme hydraulická vápna na slabě, středně a silně hydraulická (Tab. 1). Hranice mezi slabě hydraulickým vápnem a vzdušným vápnem je $M_H = 9$. Portlandský cement má hodnotu hydraulického modulu v rozmezí od 1,7 do 2,4. Ještě nižší hodnota hydraulického modulu (menší než 1,7) přísluší románskému cementu [14].

Tab. 1: Dělení pojiv dle hydraulického modulu [15]

M_H	Druh pojiva
$M_H < 1,7$	Románský cement
$1,7 < M_H < 3$	Silně hydraulické vápno
$3 < M_H < 6$	Středně hydraulické vápno
$6 < M_H < 9$	Slabě hydraulické vápno
$9 < M_H$	Vzdušné vápno

S nárůstem hydraulického modulu obsahuje pojivo větší množství CaO a proto je potřeba větší teploty při výpalu [15].

Ke správnému sestavení cementářské suroviny se používají také další cementářské moduly, a to silikátový modul M_s (2) a hlinitanový modul M_A (3).

$$M_s = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2)$$

$$M_A = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3)$$

Surovina pro přípravu portlandských cementů má silikátový modul v rozmezí od 1,7 do 2,7 [15]. Románské cementy mají hodnotu M_s nižší, což způsobuje rychlé tuhnutí a tvrdnutí při hydrataci.

Nižších hodnot (kolem 1,5) dosahuje také hlinitanový modul. Románské cementy jsou charakteristické svým okrovým až červeno-hnědým zbarvením, což je způsobeno právě vysokým obsahem Fe_2O_3 [10]. Vyšší obsah Fe_2O_3 také zvyšuje odolnost vůči chemickým vlivům [15].

2.2.2 Výpal suroviny pro výrobu románského cementu

Složení suroviny je totožné se tou, která se používá k výrobě portlandského cementu. Rozdíl však spočívá v teplotě výpalu. Portlandské cementy se vypalují při teplotě nad 1450 °C, což je nad mezí slinutí. Teploty výpalu románských cementů se pohybují v teplotním intervalu od 1000 °C do 1200 °C [14]. Při obsahu většího množství $MgCO_3$ probíhá výpal při teplotách v rozmezí od 800 °C do 1000 °C, aby nevznikl pozvolna hydratující periklas (MgO), který by mohl negativně ovlivňovat pevnost malty [15].

Výpal probíhá v šachtových nebo rotačních pecích obdobně jako výpal portlandských cementů. Cílem výpalu je, aby všechny CaO zreagoval na sloučeniny schopné hydraulického tuhnutí, tzv. slinkové minerály. Těch je možné identifikovat ve slínku okolo 20, za prakticky významné považujeme ale pouze 4 z nich (Tab. 2) [11].

Tab. 2: Značení slinkových minerálů

Cementářský vzorec	Chemický vzorec	Název slinkového minerálu	Označení
C_3S	$3CaO \cdot SiO_2$	křemičitan trojvápený (trikalciumsilikát)	alit
C_2S	$2CaO \cdot SiO_2$	křemičitan dvojvápený (dikalciumsilikát)	belit
C_3A	$3CaO \cdot Al_2O_3$	hlinitan dvojvápený (trikalciumaluminát)	-
C_4AF	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	hlinitoželezitan čtyřvápený (tatrakalciumaluminátferit)	celit

Díky tomu, že výpal probíhá za teplot do 1200 °C, nedochází ke vzniku produktu C_3S , který vzniká při teplotách nad 1250 °C. Hlavní fáze románských cementů je belit, který vzniká reakcí oxidu křemičitého z jílové složky suroviny a oxidu vápenatého, vzniklého

rozkladem kalcitu ve vápenci. C_2S tvoří přibližně 40 – 50 % celkového fázového složení cementu.

Důležitou roli v procesu tuhnutí a tvrdnutí hrají amorfní či slabě krystalické hlinitanové fáze. Tyto fáze tvoří přibližně 30 – 40 % složení cementu a ovlivňují především rychlé počáteční tuhnutí malt po smíchání cementu s vodou [10].

Slínek obsahuje také určité množství nežádoucího volného vápna (CaO), které reaguje s vodou jen velmi neochotně. Tvorbou $Ca(OH)_2$ po dlouhé době způsobuje objemový nárůst uvnitř vytvrzeného cementu, což vede k tvorbě trhlin. Maximální množství volného vápna je proto omezeno na 4% [11].

Po výpalu se vypálený kámen mele na jemný prášek, který při styku s vodou velmi rychle reaguje za vzniku hydratovaných fází, tzv. C-S-H gelu, který dává materiálu výjimečné vlastnosti [25].

2.3 Tuhnutí a tvrdnutí malt z románského cementu

Průběh hydratace je závislý na mineralogickém složení cementu, jemnosti mletí, množství záměsové vody, teplotě a přítomnosti dalších příměsí [11].

Po smísení s vodou cement tuhne a nabývá pevnosti. Tento proces vzniká jako reakce slinkových minerálů s vodou za vzniku hydrosilikátů a hydroaluminátů vápenatých, při čemž dochází ke změně struktury, která vede k vytvoření pevných spojů mezi částicemi nově utvořených látek [14].

Rychlé tuhnutí a vyšší počáteční pevnost těchto malt souvisí s vysokým obsahem amorfního podílu, který je aktivní v počáteční fázi hydratace [25].

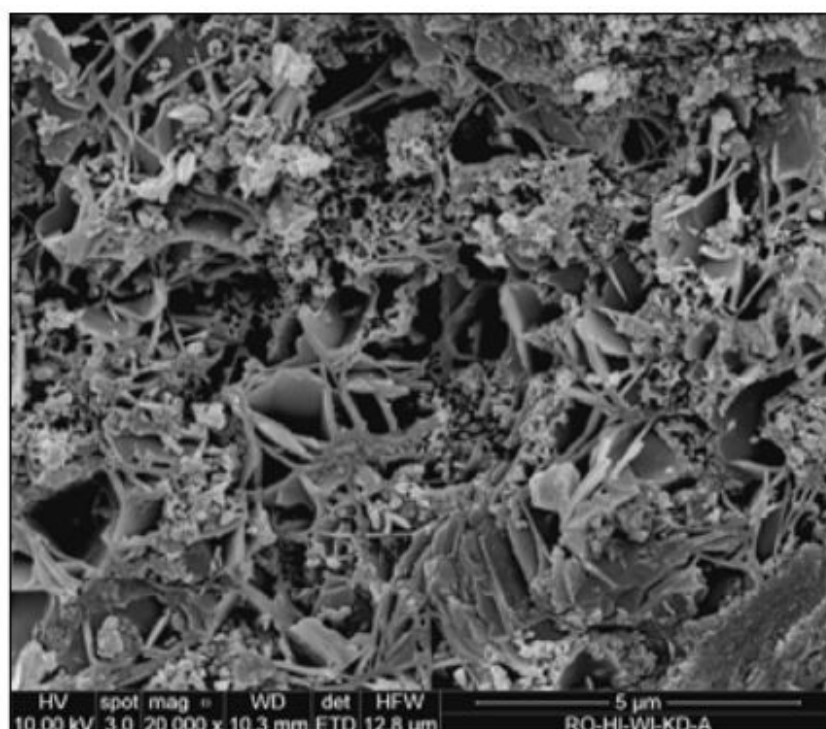
Mezi tuhnutím a tvrdnutím nastává tzv. „spící perioda“, při které nedochází ke změně pevnosti a hydratace není aktivní [10]. Při tvrdnutí je nejdůležitější reakcí hydratace belitu. Jeho reakcí s vodou vzniká C-S-H gel. Tato reakce probíhá již od začátku, avšak teprve s postupem času začne tato reakce převládat a zásadně ovlivňovat pevnost, mikrostrukturu a porozitu malt.

2.4 Vlastnosti malt na bázi románského cementu

Maltoviny, které jsou pojené románským cementem, vynikají svými netradičními vlastnostmi v porovnání s jinými maltovinami pojenými anorganickými pojivy. Obsahují

velmi malé množství volného vápna, ale mají vysoký obsah amorfních fází, které zásadně ovlivňují jejich vlastnosti [26].

Dle složení se románské cementy dají zařadit mezi portlandský cement a hydraulická vápna. Zjednodušeně lze říci, že si románské cementy berou z těchto dvou hojně užívaných pojiv ty nejlepší vlastnosti. Svou vysokou pevností se přibližují maltovinám pojeným portlandským cementem a vápenným maltám se podobají na základě vysoké nasákavosti a porozity. Tato skutečnost je dána specifickou strukturou základní hmoty těchto maltovin, která je tvořena vzájemně propojenými destičkovými hydratačními produkty (Obr. 2).



Obr. 2: Fotografie z rastrovacího elektronového mikroskopu, lomová plocha vzorku, omítka z objektu Kulissendepot ve Vidni, Porézní mikrostruktura historické malty z románského cementu s poměrně velkými destičkovitými produkty hydratace [10].

Tato struktura je výrazně ovlivněna podmínkami tvrdnutí. Významný vliv na to má vlhkost a kontakt s vodou, což vede ke vzniku kompaktnější a méně porézní struktury [10].

Románské cementy jsou známé pro velmi rychlé tuhnutí, což umožňuje rychlou výrobu odlévaných prvků fasád. Tuhnutí románského cementu Vicat od firmy Prompt je tak rychlé, že prakticky není možné jeho použití pro omítání či tvorby ozdobných prvků fasád bez přídavku zpomalovače. Tato skutečnost byla ověřena v experimentální části této práce.

Románské cementy mají také pozoruhodnou odolnost vůči korozi a atmosférickým vlivům. Tuto skutečnost dokládá velmi dobrý stav odlévaných dekorativních prvků či omítek

na fasádách budov z 19. století, což představuje dlouholeté vystavení exteriérových podmínek [26].



Obr. 3: Kostel Svatého Bruna, Grenoble, 1970 [21]

Charakteristická barva většiny románských cementů se pohybuje od nažloutlých, okrových po hnědočervené odstíny (Obr. 3). Toto zbarvení dodává těmto cementům vysoký obsah Fe_2O_3 .

2.5 Prompt cement od firmy Vicat

V experimentální části této diplomové práce byly zkoušeny malty s pojivem Prompt cement od firmy Vicat. Tento cement se v městečku Grenoble na jihovýchodě Francie vyrábí již přes 170 let [16].

2.5.1 Složení a výroba Prompt cementu

Pro výrobu Prompt cementu se používá stále stejná surovina pro výpal, která se nachází v Chartresuském masivu pocházející z křídového období. Tato surovina má konstantní chemické složení (Tab. 3).

Tab. 3: Chemické složení Prompt cementu [24]

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
18,09%	7.24%	3,20%	53,07%	3,84%	3,24%	1,16%	0,28%

Složení vstupní suroviny je podobné surovině pro výrobu portlandského cementu, rozdíl je však v rozdílném spektru teplot výpalu, které probíhají od 600 do 1200°C. Díky tomu vznikají při hydrataci minerály, které se neshodují s minerály, které vznikají při výrobě moderních portlandských cementů. Minerály Prompt cementu (Tab. 4) se shodují s těmi, co vznikají u přírodního hydraulického vápna, ačkoli mají jiný poměr složek.

Tab. 4: Fázové složení Prompt cementu [24]

C_3S	trikalcium silikát	5 – 10%
C_2S	dikalcium silikát	40 – 60%
C_3A	trikalcium aluminát	6±2%
C_4AF	tetrakalcium aluminát ferit	9±2%
$C_{12}A_7$	dodekakalcium heptaaluminát	3±1%
C_4A_3S	tetrakalcium trialuminát silikát	3±1%
MgO	periklas	4±1%
CaO	volné vápno	2±2%
$CaCO_3$	kalcit	10 – 15%
$CaSO_4$	síran vápenatý	3±1%
Jiné, včetně amorfních fází		10 – 15%

Vysoký obsah aluminátových fází je zodpovědný za rychlé tuhnutí a vysoké počáteční pevnosti. Belit zaručuje odolnost. Při hydrataci nejdříve reaguje aluminátová fáze, která je zodpovědná za rychlé tuhnutí (bez použití zpomalovače 2 až 3 minuty) a za počáteční náběhy pevnosti. Po hydrataci belitu začíná další fáze narůstání pevnosti, která může trvat i několik měsíců [24].

2.5.2 Využití Prompt cementu

Prompt cement od firmy Vicat lze zpracovávat strojně i ručně, lze z něho tvořit různé dekorativní, ale i staticky nosné prvky a velmi zdařile napodobovat kámen či různé rustikální omítky (Obr. 4). Tato vlastnost je také přínosem v oblasti restaurování památek (Obr. 5), kde je hlavním kritériem kvality vzhled dosahovaných výsledných produktů.

Snadná zpracovatelnost, regulovatelné tuhnutí a tvrdnutí jsou dobrými předpoklady pro kreativní a tvůrčí práci, proto se dá tento materiál směle využít v oblasti sochařství, či jako prvek městského mobiliáře či zahradní architektury. I zde může být výhodou přírodní vzhled materiálu.



Obr. 4: Ukázka napodobování kamene maltou s použitím Prompt cementu [16]



Obr. 5: Restaurování gotické památky [16]

2.6 Belitický cement

Románský cement je přírodní pojivo, jehož hydraulické vlastnosti, které vznikají i při tak nízké teplotě výpalu, jsou způsobeny použitím vápenců s vysokým obsahem jílových složek.

V poslední době se vyvíjí také další druhy cementů, jejichž výroba je díky nízkým teplotám výpalu pod 1200 °C šetrnější k životnímu prostředí než výpal běžného portlandského cementu. Stejně jako románské cementy mají tyto cementy vysoký obsah C_2S (belit) a neobsahují C_3S (alit), který vzniká při vyšších teplotách. Proto se tyto nízkooenergetické cementy označují jako belitické.

Problém belitických cementů je nízká reaktivita, kterou způsobuje málo reaktivní C_2S a nižší obsah C_3A oproti románským cementům [23]. Za aktivní belitické cementy se považují ty, které mají specifickými opatřeními zvýšenou reaktivitu [29].

Reaktivita C_2S se dá zvýšit následovně [30]:

- přidavkem cizích iontů do krystalové struktury během její tvorby za vysoké teploty (alkálie, sírany atd.), díky čemu se stabilizují vysokoteplotní modifikace
- prudkých chlazením slínku, díky čemuž se opět stabilizují vysokoteplotní modifikace
- přidáním portlandského cementu k belitickému slínku za účelem zvýšení rychlosti hydratace.

3. Malty

Malta je stavivo, které se připravuje smísením drobného kameniva, anorganického pojiva, popřípadě i přísad a příměsí. Tato granulární směs se následně rozmísí vodou na požadovanou konzistenci. Podle účelu použití rozeznáváme především malty pro zdění a malty pro vnitřní a vnější omítky [11].

Zkoušení malt se provádí dle norem ČSN EN 1015: Zkušební metody malt pro zdivo (tato norma má 21 částí, kdy každá se věnuje jiné laboratorní zkoušce) [1,2,3,4,6], ČSN EN 998: Specifikace malt pro zdivo (3 části) [7] a ČSN 72 2452: Zkouška mrazuvzdornosti malty.

3.1 Pojiva do malty

Tradiční hliněné malty tuhnou a tvrdnou čistě fyzikálně, tzv. koloidním sesycháním, naopak běžné soudobé malty mají pojivový systém, který tvrdne chemickou reakcí. Jeho základ tvoří nejčastěji cement nebo vápno. Nejjednodušší recept pro přípravu malty na staveništi spočívá v suchém smísení pojiva a plniva v běžné stavební míchačce a následném přidáním vody. Množství přidávané vody se volí podle požadované konzistence malty.

Vápno je nezastupitelným typem pojiva zejména pro rekonstrukce stavebních památek. Rozeznáváme vápno vzdušné, které tuhne pouze na vzduchu a vápno hydraulické, které tuhne a tvrdne i pod vodou. K tradiční výrobě hydraulického vápna se používají jílovité vápence, které kromě oxidu vápenatého (CaO) obsahují také větší množství hydraulických oxidů, jako jsou oxid křemičitý (SiO_2), oxid železitý (Fe_2O_3) a oxid hlinitý (Al_2O_3) [11].

Výpal se provádí při teplotě pod mez slinutí ($1250\text{ }^\circ\text{C}$), následuje hašení na prach (rozhašování). V případě silně hydraulických vápen s hydraulickým modulem menším než 3 se rozhašování neprovádí, protože v nich je obsah volného CaO relativně malý a tato vápna se svými vlastnostmi podobají cementům [11]. Právě takové vápno je známo pod označením románský cement. Dominantní složkou odpovědnou za hydraulické vlastnosti hydraulického vápna je C_2S (dikalciumsilikát).

3.2 Plniva do malty

Další podstatná složka malt je plnivo, jehož vlastnosti do značné míry rozhodují o trvanlivosti malty. Většinou se jako plnivo do malty používá křemičitý písek, který se těží v blízkém zdroji stavby [13]. Plnivem do malty však může být:

- přírodní kamenivo
 - jemně mletý vápenec
 - křemičitý písek
- kamenivo vyrobené z přírodních surovin
 - keramzit
 - expandovaný perlit
 - expandovaný vermikulit
- umělé kamenivo
 - granulovaná vysokopeční struska
 - škvára
 - popílek
 - slévárenský písek
 - granulovaný expandovaný polystyren
- recyklované kamenivo
 - drcené cihly

Nejběžnější je přírodní těžené kamenivo a jeho druh a zrnitost se volí podle účelu použití malty. Pro stykové malty se používá zejména frakce 0/4 a 4/8. Frakce 0/4 se používá pro malty pro zdění, pro kladení dlažeb a pro jádrovou vrstvu omítek. Pro malty na jemné omítky a pro spárování při tloušťce spáry do 4 mm se používá frakce 0/1 [11].

3.3 Voda do malty

Voda na výrobu malt z anorganických pojiv musí být nezávadná, tj. nesmí snižovat pevnost a trvanlivost malt nebo způsobovat skvrny a výkvěty na omítkách. Bez zkoušek lze používat pouze pitnou vodu. Vody jiného původu je nutno podrobit zkouškám, které zjistí obsah závadných částic [11].

3.4 Přísady do malty

K získání zvláštních úprav vlastností se často používají přísady a příměsi. Přísady jsou většinou tekuté látky, které se přidávají do malty v malém množství vzhledem k hmotnosti pojiva před nebo během míchání. Zlepšují vlastnosti především čerstvé malty, ale také se podílejí na utváření vlastností zatvrdlé malty. Podle hlavního účinku působení se rozdělují přísady na tyto druhy:

- Plastifikační – redukuje vodu

- Superplastifikační – ztekucující, velmi redukuje vodu
- Provzdušňující
- Stabilizační – zadržují vodu
- Hydrofobizační – odpuzují vodu
- Zpomalující tuhnutí
- Urychlující tuhnutí a tvrdnutí

3.5 Příměsi do malty

Podobnou funkci mohou plnit příměsi, což jsou jemně mleté anorganické materiály, které se přidávají do malty pro zlepšení vlastností nebo k dosažení zvláštních vlastností. Rozeznáváme 2 základní druhy příměsí [34]:

- Druh I – inertní příměsi – neúčastní se procesu hydratace:
 - Jemně mleté kamenivo (filer), jehož hlavní funkcí je zlepšení křivky zrnitosti, čímž se dosáhne účinnějšího zhutnění. To přispívá ke zvýšení odolnosti, čerpatelnosti a přídržnosti malty.
 - Práškové minerální pigmenty a organická prášková nebo kapalná barviva
- Druh II – latentně hydraulické příměsi a pucolány, mezi nejběžnější patří:
 - Popílek
 - Křemičitý úlet
 - Cihelná drť

3.5.1 Křemičitý úlet (*mikrosilika*)

Křemičitý úlet (Obr. 6) je jemná amorfni minerální příměs, která vzniká jako odpad v některých hutnických provozech. Tato látka obsahuje až 98 % amorfniho oxidu křemičitého (SiO_2) ve tvaru kulovitých zrn o průměru menším než 1 μm .

Vyznačuje se mimořádně velkým měrným povrchem (obvykle 20 000 až 60 000 m^2/kg) [11], díky čemuž zvyšuje pevnost malty i při současné redukci dávky pojiva, a také dobrými pucolánovými vlastnostmi.

Dále je prokázáno, že mikrosilika zvyšuje trvanlivost a odolnost vůči působení agresivního prostředí a snižuje rychlost karbonatace povrchových vrstev.



Obr. 6.: Křemičitý úlet [17]

3.5.2 Popílek

Popílek (Obr. 7) je produktem spalování hnědého nebo černého uhlí v podobě velmi jemně zrnitého prášku, který se získává zachycením v odlučovačích z plynů topenišť. Průměr zrn se pohybuje okolo 0,09 mm. Jedná se o kulovité sklovité částice sestávající převážně z oxidu křemičitého (SiO_2) a oxidu hlinitého (Al_2O_3). Aby měl popílek pucolánovou aktivitu, tak musí obsahovat nejméně 25 % aktivního SiO_2 . Popílek je možné používat jako částečnou náhradu cementu (příměs druhu II), díky čemu se sníží cena maltové směsi. Nevylučuje se ani jeho použití jako inertní plnivo (příměs druhu I) bez vlivu na dávkování cementu. Takové použití popílku optimalizuje křivku zrnitosti kameniva [11].

Dále je prokázáno, že popílek zlepšuje zpracovatelnost a soudržnost čerstvé malty, zmenšuje náchylnost na rozmíšení čerstvé malty při dopravě a zpracování, zvyšuje odolnost proti chemicky agresivnímu prostředí, příznivě ovlivňuje těsnost povrchových vrstev malty a zpomaluje proces karbonatace povrchu malty [35].



Obr. 7.: Popílek [18]

Popílek je odpad, proto může vykazovat proměnlivé chemické, mineralogické a granulometrické složení podle druhu spalování uhlí a způsobu odlučování. Použití popílku proto má svá úskalí, která je nutno respektovat a zohledňovat při výběru konkrétního typu popílku a při volbě jeho dávky. Vysoký obsah oxidu vápenatého (CaO) v popílku způsobuje objemové změny. Vysoký obsah oxidu sírového (SO_3) způsobuje síranovou korozi a také objemové změny. Vysoký podíl spalitelných látek negativně ovlivňuje obsah vzduchu v provzdušněné čerstvé maltě, zpomaluje proces tuhnutí a tvrdnutí malty a snižuje její trvanlivost. Nepřiměřená dávka popílku ovlivňuje obsah skutečně potřebné záměsové vody a mění reologické vlastnosti čerstvé malty [11].

Podle ČSN-EN 197-1 [8] se rozeznávají 2 druhy popílku:

- Křemičitý popílek - V
- Vápenatý popílek – W

3.5.3 Cihlářská hlína

Jedná se o příměs s pucolánovými vlastnostmi, která se v posledních letech hojně využívá jako příměs do malt (Obr. 8). Vzniká v malém množství jako odpad z cihlářské výroby, ale převážně drcením cihelné suti. Cihlářská hlína je u nás běžná a cenově dostupná. Nevýhodou je nákladné třídění sutin, při kterém se oddělují ostatní hmoty (např. dřevo) a také nerovnoměrná jakost cihelné drti. Dnes jsou k dispozici mobilní drtičky umožňující realizovat výrobu cihelné drtě přímo v místě budoucí spotřeby. To je výhodné tehdy, pokud je na místě zároveň zdroj cihelné suti [11,36].



Obr. 8: Cihelná drť [19]

3.5.4 Barviva

Neopomenutelnou složkou malt zejména pro omítání staveb byly a stále jsou barevné pigmenty. Historicky se názory na barevnost staveb měnily v závislosti na změnách architektonického pojetí, a tak vybarvení budov bylo výtvarně mimořádně mnohotvárné. Charakteristická barevnost, jako jeden ze slohových znaků, dotvářela podobu nejen staveb nových, ale také i jednotný způsob modernizace stávajících. Pro tu představovala nejjednodušší a ekonomicky nejvýhodnější prostředek. Technicky lze barevnost omítky docílit použitím barevného materiálu či barvotvorných přísad, nejčastěji se však užívá barevných nátěrů.

Rozeznáváme čtyři základní účely barevných řešení [13]:

- 1) imitační – barevná úprava imituje dražší nebo vzácnější materiály (např. kámen)
- 2) dekorativní – pestré barevné pojednání prvků či částí stavby
- 3) tektonické – barevnou úpravou jsou zdůrazněny tektonické prvky architektury
- 4) iluzivní – barevným nátěrem nebo malbou se nahrazují plastické tektonické články (pilastry, lizény, hlavice, římsy, okna apod.).

V minulosti nebyla nabídka pigmentů, které dokázaly probarvit omítkovou směs, příliš vysoká. Přírodní barviva, která neměnila tón v přítomnosti alkalického prostředí, které vzniká přeměnou vápna na hydroxid vápenatý, se omezovala pouze na bílé a okrové pigmenty. Při dosažení jiných barevností bylo potřeba přimísit do záměsi velké množství práškového pigmentu, což sice zajistilo intenzivnější zbarvení, ale zároveň to také zhoršovalo pevnost a soudržnost omítky po jejím vytvrdnutí [31].

Na našem území se vyráběla zejména okrová barviva z přírodních kaolinitických minerálů. Náhradou části písku malty rozemletými cihlami byl dosahován barevně stálý červený odstín. Tato barva se také vyráběla žiháním krevelu, či tepelným rozkladem železitých a železnatých solí. Jako běloba se často používalo dokonale vyhašené a vyzrálé vápno, či jemně mleté vápence nebo plavené křídly. Jako modř se používala tzv. šmolka, což je křemičitan kobaltnato-drslý, vyráběný ve sklárnách nebo manganová modř, což je směs síranu a manganistanu barnatého, která vyniká stálostí na povětrnosti. Pálením kostí bez přístupu vzduchu vznikala kostní čern [13].

Dnes je na trhu široká škála anorganických pigmentů. Chemické složení anorganických pigmentů je jednoduché, většinou se jedná o oxidy, sulfidy nebo sírany. Jejich výroba klade vysoké nároky na čistotu a velikost částic, optické a další vlastnosti. K probarvování malt se nejčastěji používají železité pigmenty na bázi Fe_2O_3 [31].

Dále se uplatňuje jako pigment také TiO_2 . Je to pigment s nejlepší krycí schopností ze všech bílých pigmentů, kterého se ve světě vyrábějí milióny tun ročně. Na světle je stálý a odolává zředěným kyselinám i zásadám. Není toxický. Je znám pod pojmem titanová běloba a používá se hlavně do nátěrových hmot.

4. Experimentální část

Cílem experimentální části této diplomové práce je porovnání vlastností čerstvých a ztvrdlých malt na bázi románského cementu s příměsí průmyslových a stavebních odpadů. Byly vybrány tyto příměsi:

- elektrárenský popílek, tepelná elektrárna Dětmárovice
- cihlářská hlína žíhaná při teplotě 600 °C, cihelna Bratronice
- cihlářská hlína žíhaná při teplotě 850 °C, cihelna Bratronice
- antuka (drcený odpad z cihlářské výroby), cihelna Bratronice.

Bylo namícháno celkem 6 záměsí (Tab. 5). U každé bylo dodrženo konstantní množství plniva. Příměsi byly dávkovány na „úkor“ množství pojiva. Vždy objemově, jak je to běžné (bylo to běžné) pro míchání malt u historických staveb. Záměs byla vyhotovena v potřebném množství vzorků pro zkoušení pevnosti v tahu a v tlaku po 7, 28, 56, 112 a 224 dnech. Z každé záměsi se proto vyrobilo 15 zkušebních těles o rozměrech 40x40x160 mm.

Tab. 5: Přehled namíchaných vzorků

Druh příměsi	x% z množství cementu	Počet zkušebních těles	Značení vzorků
Referenční vzorek	-	15	1.1.1 - 1.3.3
Cihlářská hlína žíhaná při 600°C	10%	15	2.1.1 - 2.3.3
Cihlářská hlína žíhaná při 850°C	10%	15	3.1.1 - 3.3.3
Popílek	10%	15	4.1.1 - 4.3.3
Popílek	20%	15	5.1.1 - 5.3.3
Antuka	10%	15	6.1.1 - 6.3.3

Poznámka ke značení vzorků.: Zkušební tělesa jsou označena třemi čísly, kdy první číslo (hodnota 1 až 6) udává, jaká příměs byla pro vytvoření tělesa použita. Druhé číslo n (hodnota 1 až 5) udává, kolikadenní pevnost v tahu a v tlaku bude na daném tělese zkoušena. Třetí číslo m (hodnota 1 až 3) neudává žádnou speciální informaci, má pouze popisný charakter.

4.1 Výroba zkušebních těles

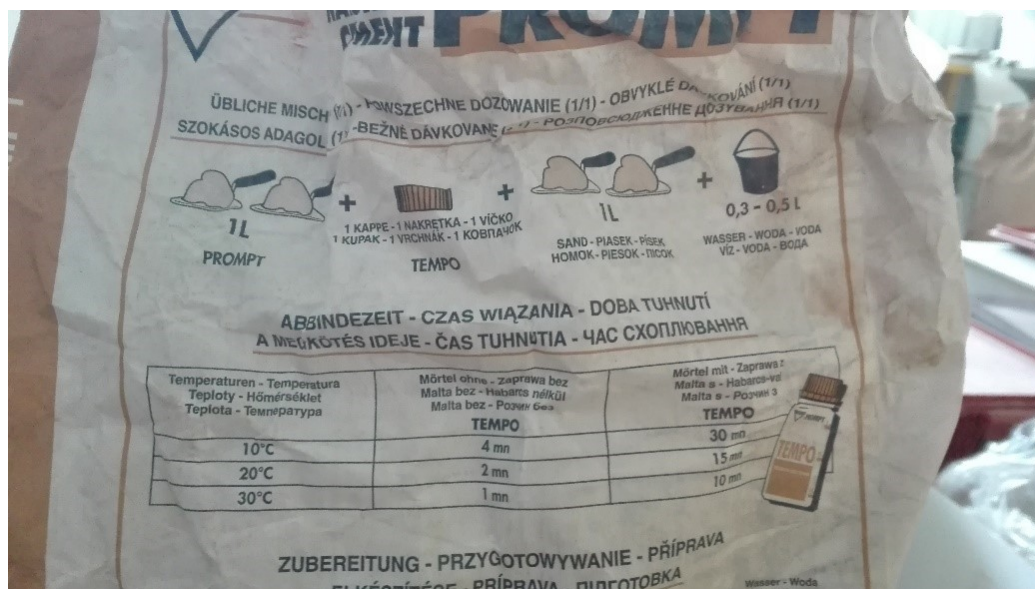
Čerstvá malta určená ke zkoušení a přípravě zkušebních těles musí mít, pokud je to možné, vhodnou konzistenci. Pokud není uvedeno jinak, připraví se vzorek čerstvé malty s předepsanou hodnotou rozlití tak, jak je uvedeno v tabulce č. 2 v příslušné normě ČSN EN 1015-2 [1]. Obsah vody potřebný ke stanovení této konzistence se stanovuje pomocí pokusných záměsí.

Objemová hmotnost všech malt vytvořených pro potřeby této diplomové práce přesáhla hodnotu 1200 kg/m^3 , proto byla hlídána hodnota rozlití $175 \pm 10 \text{ mm}$. K dosažení této konzistence byl přizpůsoben vodní součinitel všech namíchaných záměsí.

Míchání bylo prováděno dle pokynů výrobce cementu Prompt což je firma Vicat. Tento cement byl použit jako pojivo všech záměsí pro potřeby této diplomové práce.

Záměs má obsahovat dle pokynů výrobce (Obr. 9) tento poměr složek:

- 1 l Prompt cement
- 1 víčko urychlovač tuhnutí Tempo (7 g dle lahvičky z urychlovačem)
- 1 l kamenivo (písek)
- 0,3 – 0,5 l voda



Obr. 9: Receptura dle výrobce

Dávkování cementu, urychlovače a plniva bylo dodrženo dle pokynů výrobce. Množství vody bylo vždy odhadnuto tak, aby byla dosažena požadovaná konzistence. Další příměsi byly přidávány jako procentuální podíl z celkového množství pojiva.

Po namíchání každé směsi byly stanoveny tyto zkoušky vlastností čerstvé malty:

- Stanovení konzistence čerstvé malty dle ČSN EN 1015-3 [2]
- Objemová hmotnost čerstvé malty dle ČSN EN 1015-6 [3]
- Obsah vzduchu v čerstvé maltě dle ČSN EN 1015-7 [4]

Poté byly směsi uloženy do forem a zabalené do igelitu z důvodu simulování prostředí po vyhotovení omítky na stavbách. Zabalené formy se na 48 hodin vložily do klimatické komory CTS C-40/1000/S (Obr. 10), která byla nastavena na prostředí s teplotou 20° C a relativní vlhkostí 60 %. Po 48 hodinách byly vzorky odformovány a ponechány v klimatické komoře zabalené v igelitu dalších 5 dní. Přitom každý den byly vzorky vlhčeny vodou ze stříčky.



Obr. 10: Klimatická komora CTS C-40/1000/S

Po týdnu od míchání byly všechny vzorky vyjmuty z klimatické komory a ponechány v laboratorním prostředí (stále zabalené v igelitu) po dobu 56 dnů. Na třech souborech vzorků se postupně stanovovaly pevnostní zkoušky po 7, 28 a 56 dnech (Tab. 6).

Tab. 6: Klimatizování zkušebních těles

Čas	Prostředí	Teplota vzduchu	Relativní vlhkost vzduchu	Zkoušení vlastností	Poznámky
1. - 2. den	klimatická komora	20 °C	60 % R.V.	-	Tělesa ve formách obalených igelitem, denně vlhčeno vodou
3. - 7. den	klimatická komora	20 °C	60 % R.V.	Pevnost v tahu ohybem a v tlaku po 7 dnech	Odformovaná tělesa zabalená v igelitu, denně vlhčeno vodou
8. - 28. den	laboratorní prostředí	22 ± 2 °C	50 ± 5% R.V.	Pevnost v tahu ohybem a v tlaku po 28 dnech	Tělesa zabalená v igelitu
29. - 56. den	laboratorní prostředí	22 ± 2 °C	50 ± 5% R.V.	Pevnost v tahu ohybem a v tlaku po 56 dnech	Tělesa zabalená v igelitu

Zbylé dva soubory vzorků byly po 56 dnech přesunuty do venkovního prostředí. Tyto soubory budou použity pro stanovení dlouhodobých pevností, které již však nejsou obsahem této diplomové práce.

4.2 Stanovení konzistence čerstvé malty

Konzistence je dle normy ČSN EN 1015-3 [2] charakterizována rozlitím čerstvé malty a poskytuje údaje o zpracovatelnosti při aplikaci na zdivo.

Hodnota rozlití se stanoví změřením průměru rozlitého zkušebního vzorku čerstvé malty umístěné na předepsané desce střešacího stolku pomocí kovového kužele po předepsaném počtu svislých pádů, při nichž se deska střešacího stolku zvedá a pak volně padá z předepsané výšky [2].

4.2.1 Postup zkoušky

- 1) Před každou zkouškou se deska a vnitřní povrch včetně okraje kužele očistí vlhkou houbou či tkaninou a otřou se do sucha.
- 2) Kovový kužel se umístí do středu desky střešacího stolku a naplní se maltou ve dvou vrstvách, z nichž každá vrstva se rozprostře nejméně 10 lehkými údery dusadla. Je dobré během plnění jednou rukou přitlačovat kužel k desce.
- 3) Poté se kužel lehce zvedne kolmo vzhůru a malta se na desce střešacího stolku rozlije 15 nárazy s konstantní frekvencí jednoho zdvihu za 1 sekundu.

- 4) Nakonec se změří průměr koláče malty ve dvou na sebe kolmých směrech pomocí vhodného měřítka [2].

4.2.2 Vyjádření výsledků

Průměr koláče byl změřen pravítkem (Obr. 11) s přesností na 1 mm ve dvou na sebe kolmých směrech a zaznamenán to tabulky.



Obr. 11: Měření rozlití čerstvé malty

Hodnoty rozlití byly porovnány s předepsanými hodnotami rozlití pro různé druhy malt vztahující se na objemovou hmotnost čerstvé malty uvedenými v ČSN EN 1015-2 [2]. Hodnota rozlití má být (175 ± 10) mm pro malty, které mají objemovou hmotnost větší než $1\,200\text{ kg/m}^3$. Všechny malty tento požadavek splňují (Tab. 7).

Tab. 7: Výpočet rozlití

Značení vzorků	Druh příměsi	Vodní součinitel [-]	Rozlití 1 [mm]	Rozlití 2 [mm]	Ø Rozlití [mm]	Vyhovuje
1.n.m	Referenční záměs	0,46	179	180	180	ANO
2.n.m	Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	0,47	175	174	175	ANO
3.n.m	Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	0,47	181	179	180	ANO
4.n.m	Popílek - 10%	0,46	177	176	177	ANO
5.n.m	Popílek - 20%	0,46	175	176	176	ANO
6.n.m	Antuka - 10%	0,47	176	176	176	ANO

4.3 Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty

Objemová hmotnost se dle normy ČSN EN 1015-6 [3] stanoví jako poměr její hmotnosti a objemu, je-li vnesena, nebo vnesena a zhutněna, předepsaným způsobem do měřicí nádoby daného objemu.

Norma udává předepsané postupy plnění a hutnění dle hodnoty rozlití. Všechny malty vytvořené pro potřeby této diplomové práce spadají do kategorie plastická malta, protože jejich hodnota rozlití se pohybuje mezi 140 mm a 200 mm [3].

4.3.1 Postup zkoušky

- 1) Měřicí nádoba o známém objemu (Obr. 12) se naplní maltou pomocí lopatky, až malta přesáhne okraje
- 2) Měřicí nádoba se umístí na vibrační stolek a vibruje se tak dlouho, až nedochází k dalšímu sesedávání malty.
- 3) Během vibrování se přidává další malta tak, aby přesahovala nádobu.
- 4) Pomocí špachtle se přebytečná malta setře a povrch malty se urovná s horním okrajem měřicí nádoby.
- 5) Nádoba se očistí vlhkou tkaninou a zváží s přesností na 1 g.
- 6) Je nutné znát také hmotnost měřicí nádoby, kterou odečteme od celkové hmotnosti nádoby s čerstvou maltou [3].



Obr. 12: Měřicí nádoba pro stanovení obsahu vzduchu a objemové hmotnosti

4.3.2 Vyjádření výsledků

Objemová hmotnost ρ (kg/m³) **každé zkušební záměsi** se vypočítá podle vzorce (2) dle ČSN EN 1015-6 [3]:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v} \quad (2)$$

kde	ρ_m	objemová hmotnost čerstvé malty [kg/m ³]
	m_1	hmotnost prázdné měřicí nádoby [g]
	m_2	hmotnost měřicí nádoby naplněné maltou [g]
	V_v	objem měřicí nádoby [dm ³]

Objemová hmotnost se zaokrouhlí na 10 kg/m³ [3] a zaznamená do tabulky (Tab. 8).

Tab. 8: Výpočet objemové hmotnosti čerstvé malty

Značení vzorků	Druh příměsi	m_1 [g]	m_2 [g]	V_v [dm ³]	ρ_m [kg/m ³]
1.n.m	Referenční záměs	1243,0	3185,0	1,0	1940
2.n.m	Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	1243,0	3171,0	1,0	1930
3.n.m	Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	1243,0	3187,0	1,0	1940
4.n.m	Popílek - 10%	1243,0	3194,0	1,0	1950
5.n.m	Popílek - 20%	1243,0	3191,0	1,0	1950
6.n.m	Antuka - 10%	1243,0	3180,0	1,0	1940

4.4 Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé maltě

Obsah vzduchu v čerstvé maltě se dle normy ČSN EN 1015-7 [4] zjišťuje pomocí tlakové nádoby. Malta se umístí do měřicí nádoby a nad povrch malty se přivede voda. Tlakovým vzduchem se působí na vzduch rozptýlený v pórech malty. Hladina vody poklesne a charakterizuje objem vzduchu, vytlačený z malty [4].

4.4.1 Postup zkoušky

- 1) Tlaková nádoba se zcela naplní maltou asi ve 4 přibližně stejných vrstvách, z nichž každá se zhutní 10 krátkými údery dusadla a rozprostře tak, aby mohl být zarovnan povrch malty.

- 2) Vnější část nádoby na vzorek se očistí a osuší a víko (Obr. 13) se pomocí svorek připevní k nádobě.
- 3) Vyrovnávací ventil mezi vzduchovou komorou a nádobou na vzorek se uzavře.
- 4) Do levého ventilu se nahání voda tak, aby byl vytlačován vzduch z prostoru pod víkem pravým ventilem ven.
- 5) Oba ventily se uzavřou a otevře se vyrovnávací ventil mezi vzduchovou komorou a nádobkou na vzorek.
- 6) Po dosažení rovnovážného stavu se z kalibrovaného tlakoměru odečte obsah vzduchu [4].



Obr. 13: Víko kalibrovaného tlakoměru pro stanovení obsahu vzduchu

4.4.2 Vyjádření výsledků

Hodnota obsahu vzduchu je zaokrouhlena na 0,5 % a zaznamenána do tabulky (Tab. 9).

Tab. 9: Výsledky stanovení obsahu vzduchu jednotlivých záměsí

Značení vzorků	Druh příměsi	Obsah vzduchu [%]
1.n.m	Referenční záměs	4,0%
2.n.m	Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	4,0%
3.n.m	Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	4,0%
4.n.m	Popílek - 10%	4,5%
5.n.m	Popílek - 20%	4,5%
6.n.m	Antuka - 10%	4,0%

4.5 Stanovení počátku tuhnutí čerstvé malty

Dle normy ČSN EN 196-1 [5] se počátek doby tuhnutí projevuje jako určitý odpor cementové kaše normální konzistence proti vnikání normalizovaného jehly. Množství vody, potřebné pro takovou kaši, se stanovuje pokusným vnikáním penetračního válečku do kaší s různým obsahem vody. Tuhnutí se sleduje vnikáním jehly do cementové kaše normální konzistence, až je dosaženo určité předepsané hodnoty [5].

4.5.1 Postup zkoušky

- 1) Nejdříve se připraví 500 g cementu a určité množství vody. Suroviny po dobu 3 minut mícháme v míchačce.
- 2) Vicatův přístroj se nastaví do nulové polohy.
- 3) Na olejem natřenou destičku se postaví pryžový prstenec a začne se plnit cementovou kaší.
- 4) Prstenec se vloží pod hustoměrný váleček, tak aby povrch cementové kaše lícovale se spodní plochou válečku. Aretační šroub se odjistí 4 min po vsypání cementu do vody. Po odjističení dochází k pronikání válečku do cementové kaše (Obr. 14).
- 5) Odečtená hodnota udává vzdálenost mezi spodní plochou hustoměrného válečku a skleněnou destičkou.
- 6) Zkouška se opakuje tak dlouho, dokud se nedostáhne vzdálenosti (6 ± 2) mm.
- 7) Po namíchání kaše o normální hustotě se postupuje dále ke zkoušení počátku tuhnutí. Na Vicatově přístroji se vymění hustoměrný váleček za jehlu a nastaví se do nulové polohy.
- 8) Pryžový prstenec se naplní cementovou kaší o normální hustotě a vloží do Vicatova přístroje, tak aby se jehla dotýkala povrchu cementové kaše.
- 9) Po uvolnění aretačního šroubu vniká jehla do cementové kaše (Obr. 14). Počátkem tuhnutí se rozumí doba, která uplyne od vsypání cementu do míchačky až do okamžiku, kdy vzdálenost mezi jehlou a destičkou činí (6 ± 3) mm.
- 10) Vicatův prstenec se po zkoušce počátku doby tuhnutí na skleněné destičce otočí a vloží se zpět do zkušebního zařízení, u kterého se vymění jehla za jehlu s kruhovým nástavcem. Ta se zajistí v takové poloze, aby se hrotem dotýkala povrchu cementové kaše.
- 11) Po uvolnění zajišťovacího šroubu jehla s kruhovým nástavcem vniká do cementové kaše. Koncem tuhnutí se rozumí doba, která uplynula od vsypání cementu

do míchačky po okamžik, kdy jehla pronikla do zatvrdlé cementové kaše jen do hloubky 0,5 mm (Obr. 14) [5].



Obr. 14: Vicatův přístroj při stanovení normální hustoty (vlevo), počátku tuhnutí (uprostřed) a konce tuhnutí (vpravo)

4.5.2 Vyjádření výsledků

Počátek tuhnutí se uvádí s přesností na 5 min a konec tuhnutí s přesností na 15 min [5]. Výjimkou je zkoušení Prompt cementu bez přídavku zpomalovače, kdy počátek i konec tuhnutí nastal tak rychle, že je nutné vyjádřit čas s větší přesností (Tab. 10).

Tab. 10: Vyjádření výsledků počátku a konce tuhnutí

Značení vzorků	Druh příměsi	Zpomalovač tuhnutí Tempo [g]	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]
1.n.m	Referenční záměs	0	7	7,5
1.n.m	Referenční záměs	2,2	110	210
1.n.m	Referenční záměs	4,4	190	315
2.n.m	Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	4,4	195	345
3.n.m	Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	4,4	205	345
4.n.m	Popílek - 10%	4,4	220	>360
5.n.m	Popílek - 20%	4,4	225	>360
6.n.m	Antuka - 10%	4,4	210	>360

4.6 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu se dle normy ČSN EN 1015-11 [6] stanovuje tříbodovým zatěžováním do porušení zkušebních těles ze zatvrdlé malty [6].

4.6.1 Postup zkoušky

- 1) Příprava zkušebních těles proběhla dle normy ČSN EN 1015-11 [6] a její postup je zaznamenán v kapitole 3.1, kde je popsána také klimatizace zkušebních těles před zkoušením pevností.
- 2) Po 7, 28 a 56 dnech se vzorky vyjmou z igelitu. Změří se šířka b a výška d s přesností na 0,02 mm pomocí mechanického posuvného měřítka na všech vzorcích.
- 3) Všechny vzorky se také zváží na digitálních vahách s přesností na 1 g a změří se délka pomocí pravítka s přesností na 0,5 mm pro stanovení objemové hmotnosti (Obr. 15).
- 4) Nastaví se vzdálenost spodních podpor lisu na 100 mm.
- 5) Zatížení se vyvozuje bez rázů rovnoměrnou rychlostí v rozsahu od 10 N/s do 50 N/s tak, aby k porušení došlo v intervalu 30 s až 90 s (Obr. 16) a maximální vynaložené zatížení se zaznamená. Zlomená zkušební tělesa se použijí pro stanovení pevnosti v tlaku. Do tabulky se zaznamená maximální dosažené zatížení v N.



Obr. 15: Měření rozměrů zkušebních těles pomocí posuvného měřítka



Obr. 16: Zkušební těleso po zatěžování ohybem

4.6.2 Vyjádření výsledků

Pevnost v tlaku za ohybu f (N/mm²) **každého zkušební tělesa** se vypočítá podle vzorce (3) dle ČSN EN 1015-11 [6]:

$$f = 1,5 \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (3)$$

kde	f	pevnost v tahu za ohybu [N/mm]
	F	maximální zatížení na zkušební těleso [N]
	l	vzdálenost mezi osami podpěrných válců [mm]
	b	šířka zkušební tělesa [mm]
	d	výška zkušební tělesa [mm]

Pevnost v tahu za ohybu se uvede pro každé zkušební těleso s přesností na 0,05 N/mm². Průměrná hodnota se vypočítá s přesností 0,1 N/mm² [6] a zapíše do tabulky (Tab. 11,12,13,14).

Tab. 11: Výpočet pevnosti v tahu za ohybu po 7 dnech

Příměs	Označení	Rozlití [mm]	l [mm]	b [mm]	d [mm]	F_7 [N]	f_7 [N/mm ²]	\bar{f}_7 [N/mm ²]
Referenční vzorek	1.1.1	180	100	39,56	40,06	606	1,45	1,4
	1.1.2			40,3	40,08	601	1,40	
	1.1.3			39,86	40,08	625	1,45	
Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	2.1.1	175	100	40,96	39,76	552	1,30	1,3
	2.1.2			39,9	39,78	564	1,35	
	2.1.3			40,6	39,82	500	1,15	
Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	3.1.1	180	100	40,8	40,38	617	1,40	1,3
	3.1.2			40,76	40,16	519	1,20	
	3.1.3			40,28	39,88	558	1,30	
Popílek - 10%	4.1.1	177	100	39,96	40,46	569	1,30	1,4
	4.1.2			41,1	40,2	609	1,40	
	4.1.3			41,46	40,28	616	1,35	
Popílek - 20%	5.1.1	176	100	39,28	40,54	581	1,35	1,3
	5.1.2			39,52	40,14	582	1,35	
	5.1.3			38,36	40,32	550	1,30	
Antuka - 10%	6.1.1	176	100	40,56	40,28	508	1,15	1,2
	6.1.2			38,32	40,16	494	1,20	
	6.1.3			38,14	40,36	467	1,15	

Tab. 12: Výpočet pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech

Příměs	Označení	Rozlití [mm]	l [mm]	b [mm]	d [mm]	F ₂₈ [N]	f ₂₈ [N/mm ²]	Ø f ₂₈ [N/mm ²]
Referenční vzorek	1.2.1	180	100	40,1	40,16	651	1,50	1,6
	1.2.2			39,56	40,08	723	1,70	
	1.2.3			40,02	40,12	726	1,70	
Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	2.2.1	175	100	39,72	40,14	1156	2,70	2,5
	2.2.2			39,4	40,22	1048	2,45	
	2.2.3			39,2	40,26	951	2,25	
Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	3.2.1	180	100	40,06	40,16	802	1,85	1,8
	3.2.2			39,04	40,24	771	1,85	
	3.2.3			39,02	40,22	714	1,70	
Popílek - 10%	4.2.1	177	100	40,68	39,48	981	2,30	2,4
	4.2.2			40,96	40,1	1028	2,35	
	4.2.3			41,26	40,08	1095	2,50	
Popílek - 20%	5.2.1	176	100	39,56	39,98	594	1,40	1,5
	5.2.2			39,98	40,08	648	1,50	
	5.2.3			38,8	40,06	616	1,50	
Antuka - 10%	6.2.1	176	100	38,02	40,28	410	1,00	1,1
	6.2.2			39,66	40,28	459	1,05	
	6.2.3			40,02	39,98	502	1,20	

Tab. 13: Výpočet pevnosti v tahu za ohybu po 56 dnech

Příměs	Označení	Rozlití [mm]	l [mm]	b [mm]	d [mm]	F ₅₆ [N]	f ₅₆ [N/mm ²]	Ø f ₅₆ [N/mm ²]
Referenční vzorek	1.3.1	180	100	39,1	40,04	1162	2,80	2,8
	1.3.2			39,92	40,22	1118	2,60	
	1.3.3			40,2	40,4	1347	3,10	
Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	2.3.1	175	100	39,92	40,02	1506	3,55	3,3
	2.3.2			40,12	40,38	1575	3,60	
	2.3.3			40,34	40,12	1151	2,65	
Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	3.3.1	180	100	40,92	40,8	1238	2,75	3,1
	3.3.2			40,02	41,08	1495	3,30	
	3.3.3			40,78	40,52	1419	3,20	
Popílek - 10%	4.3.1	177	100	40,34	40,28	1442	3,30	3,5
	4.3.2			40,1	40,22	1523	3,50	
	4.3.3			40,3	40,28	1572	3,60	
Popílek - 20%	5.3.1	176	100	39,6	40,14	1312	3,10	3,2
	5.3.2			40,22	40,26	1378	3,15	
	5.3.3			39,62	40,3	1404	3,25	
Antuka - 10%	6.3.1	176	100	40,38	40,4	815	1,85	1,7
	6.3.2			40,52	40,22	700	1,60	
	6.3.3			40,34	40,18	760	1,75	

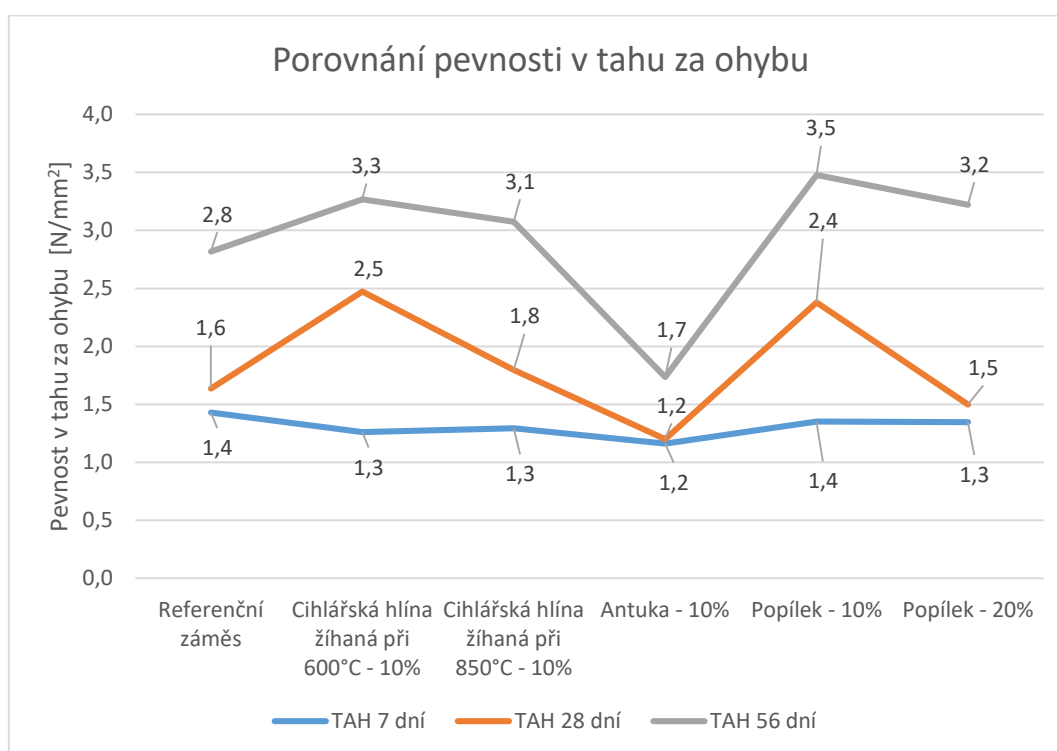
4.6.3 Porovnání pevnosti v tahu za ohybu

Z naměřených výsledků byl vytvořen graf závislosti pevnosti v tahu za ohybu na čase na jednotlivých záměsích (Graf 1,2,3,4,5,6,7).

Tab. 14: Porovnání pevnosti v tahu za ohybu

Druh příměsi	f_7 [N/mm ²]	f_{28} [N/mm ²]	f_{56} [N/mm ²]
Referenční záměs	1,4	1,6	2,8
Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	1,3	2,5	3,3
Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	1,3	1,8	3,1
Antuka - 10%	1,2	1,1	1,7
Popílek - 10%	1,4	2,4	3,5
Popílek - 20%	1,3	1,5	3,2

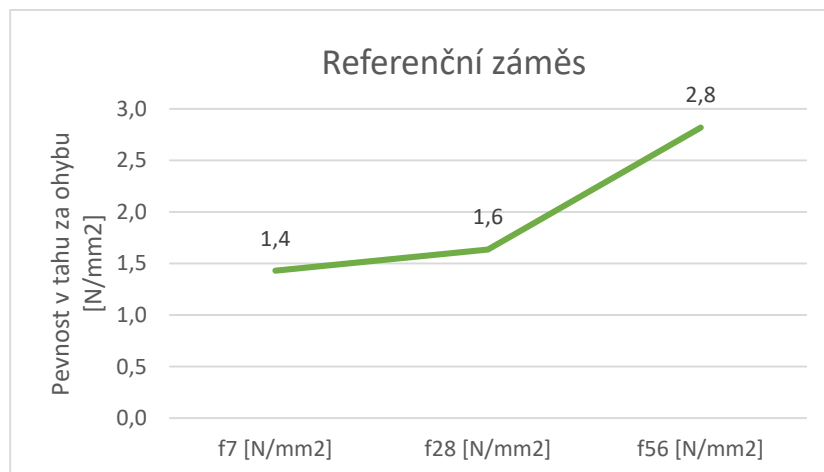
Graf 1: Porovnání pevnosti v tahu za ohybu



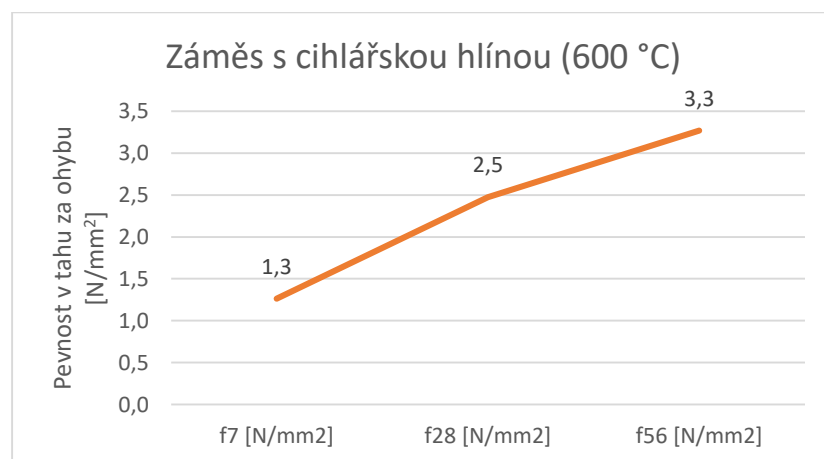
Z naměřených výsledků je patrné, že přidavek cihlářské hlíny vypálené při 600 °C přispívá ke zvýšení pevnosti v tahu ohybem (Graf 2). Použití cihlářské hlíny vypálené při větší teplotě však způsobuje výrazný pokles pevnosti. Nejmenší pevnost v tahu ohybem má malta s antukou, u níž lze předpokládat, že byla vypálená na teplotu 1000 °C, což je běžná teplota výpalu cihel.

10% přídavek popílku do malty působí obdobně, jako cihlářská hlína žíhaná při 600 °C. 20% přídavek popílku způsobuje nízký nárůst pevnosti v tahu ohybem po 28 dnech, ale po 56 dnech dosahuje malta s touto příměsí již mnohem vyšší pevnosti, které se vyrovnají pevnostem malty s 10% popílku a s 10% cihlářské hlíny žíhané při 600 °C.

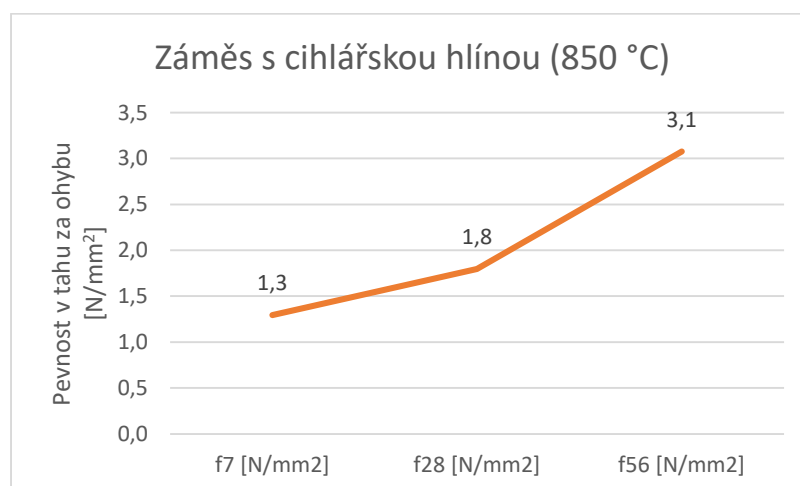
Graf 2: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu referenční záměsi



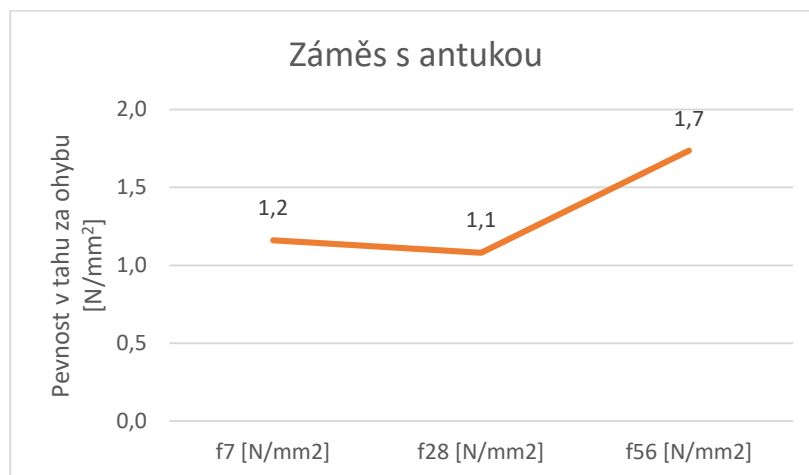
Graf 3: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s cihlářskou hlínou (600 °C)



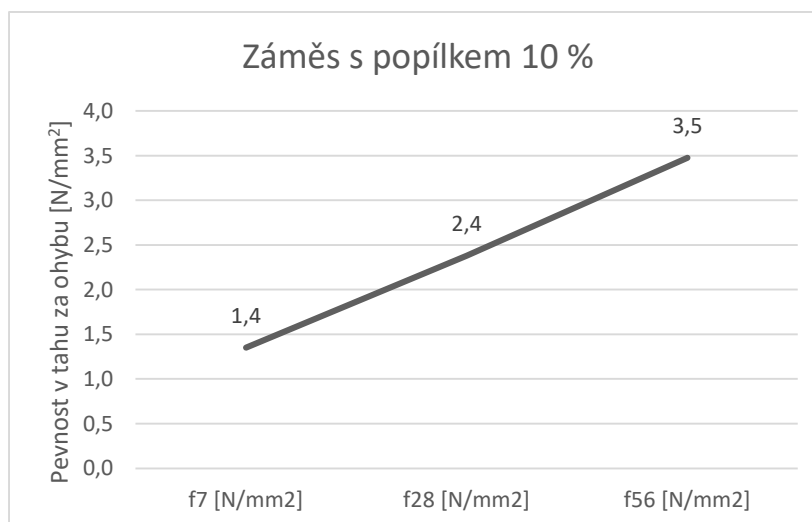
Graf 4: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s cihlářskou hlínou (850 °C)



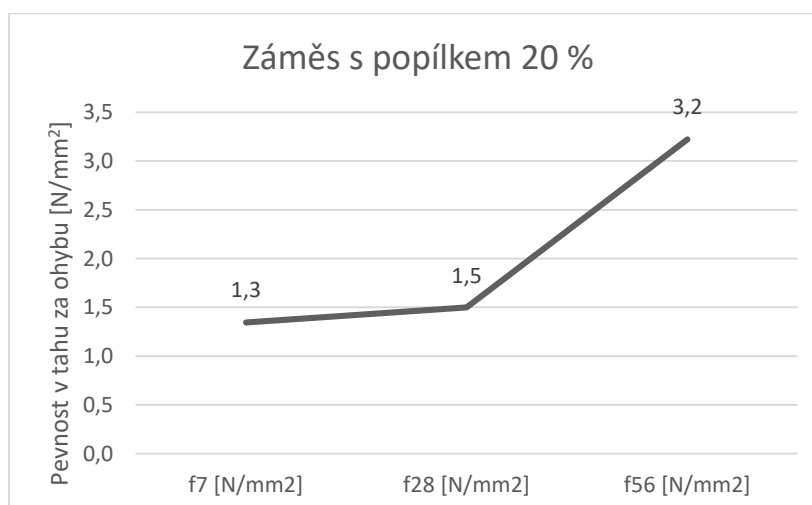
Graf 5: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s antukou



Graf 6: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s popílkem 10 %



Graf 7: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s popílkem 20 %

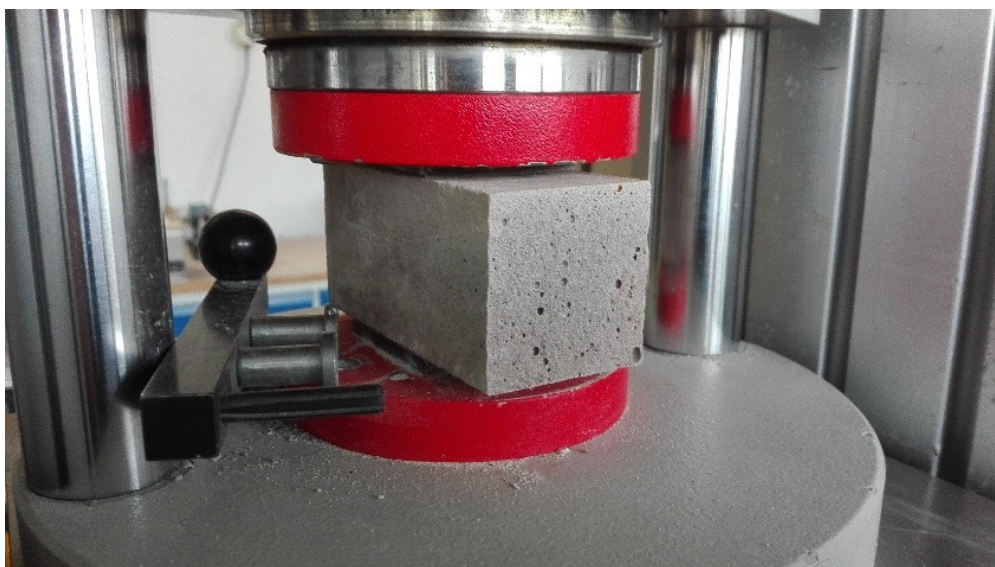


4.7 Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost malty v tlaku se dle normy ČSN EN 1015-11 [6] zkouší na dvou částech trámečku po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu.

4.7.1 Postup zkoušky

- 1) Pevnost v tlaku se stanovuje na zkušebních tělesech, které zbydou po stanovení pevnosti v tahu za ohybu.
- 2) Vzorky se postupně vkládají do lisu a podrobují se zkoušce stanovení pevnosti v tlaku.
- 3) Zatížení se vyvozuje bez rázů rovnoměrnou rychlostí v rozsahu od 50 N/s do 500 N/s, aby k porušení došlo v interval 30 s až 90 s. Pevnosti v tlaku se předpokládají větší než 6 MPa, proto lze dle normy ČSN EN 998-1 [7] zařadit tyto malty do kategorie CS IV. Zkušební tělesa, které spadají do této kategorie, se smí zatěžovat rychlostí 400 N/s, což udává příloha A1 normy ČSN EN 1015-11 [6].
- 4) Do tabulky se zaznamená maximální dosažené zatížení v N.



Obr. 17: Zatěžování zkušebního tělesa pro stanovení pevnosti v tlaku

4.7.2 Vyjádření výsledků

Pevnost v tlaku f_t (N/mm²) **každého zkušební tělesa** se vypočítá podle vzorce (4) dle ČSN EN 1015-11 [6]:

$$f_t = \frac{F}{b_1 \cdot b_2} \quad (4)$$

kde f_t pevnost v tlaku [N/mm]

F maximální zatížení na zkušební těleso [N]

b_1, b_2 rozměry po výpočet průřezové plochy zkušební tělesa [mm]

Pevnost v tlaku se uvede pro každé zkušební těleso s přesností na 0,05 N/mm². Průměrná hodnota se vypočítá s přesností 0,1 N/mm² [6] a zapíše do tabulky (Tab. 15,16,17,18).

Tab. 15: Výpočet pevnosti v tlaku po 7 dnech

Příměs	Ozn.	Rozlití [mm]	d [mm]	b [mm]	F _{t7,1} [N]	F _{t7,2} [N]	f _{t7,1} [N/mm ²]	f _{t7,2} [N/mm ²]	Ø f _{t7} [N/mm ²]
Referenční vzorek	1.1.1	180	40	39,56	6990	7090	4,45	4,50	4,6
	1.1.2			40,3	8000	7340	4,95	4,55	
	1.1.3			39,86	7620	7270	4,80	4,55	
Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	2.1.1	175	40	40,96	6980	6950	4,25	4,25	4,2
	2.1.2			39,9	7250	6910	4,55	4,35	
	2.1.3			40,6	6390	5960	3,95	4,65	
Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	3.1.1	180	40	40,8	7420	7340	4,55	4,50	4,7
	3.1.2			40,76	7280	7550	4,45	4,65	
	3.1.3			40,28	7640	7750	4,75	4,80	
Popílek - 10%	4.1.1	177	40	39,96	7290	6560	4,55	4,10	4,6
	4.1.2			41,1	7920	7810	4,80	4,75	
	4.1.3			41,46	7780	7560	4,70	4,55	
Popílek - 20%	5.1.1	176	40	39,28	7350	7230	4,70	4,60	4,8
	5.1.2			39,52	7820	7670	4,95	4,85	
	5.1.3			38,36	7400	7400	4,80	4,80	
Antuka - 10%	6.1.1	176	40	40,56	5640	5310	3,50	3,25	3,5
	6.1.2			38,32	5500	5480	3,60	3,60	
	6.1.3			38,14	5430	5550	3,55	3,65	

Tab. 16: Výpočet pevnosti v tlaku po 28 dnech

Příměs	Ozn.	Rozlití [mm]	l [mm]	b [mm]	F _{t28,1} [N]	F _{t28,2} [N]	f _{t28,1} [N/mm ²]	f _{t28,2} [N/mm ²]	Ø f _{t28} [N/mm ²]
Referenční vzorek	1.2.1	180	40	40,1	9510	9460	5,95	5,90	5,7
	1.2.2			39,56	9070	9260	5,75	5,85	
	1.2.3			40,02	8540	8650	5,35	5,40	
Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	2.2.1	175	40	39,72	17370	16560	10,95	10,40	10,6
	2.2.2			39,4	17240	16340	10,95	10,35	
	2.2.3			39,2	16640	16600	10,60	10,60	
Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	3.2.1	180	40	40,06	9580	9240	6,00	5,75	5,9
	3.2.2			39,04	9230	9220	5,90	5,90	
	3.2.3			39,02	9360	9110	6,00	5,85	
Popílek - 10%	4.2.1	177	40	40,68	14950	15140	9,20	9,30	9,2
	4.2.2			40,96	14800	15580	9,05	9,50	
	4.2.3			41,26	14810	14880	8,95	9,00	
Popílek - 20%	5.2.1	176	40	39,56	8070	8830	5,10	6,00	5,2
	5.2.2			39,98	7780	8290	4,85	5,20	
	5.2.3			38,8	7380	8660	4,75	5,60	
Antuka - 10%	6.2.1	176	40	38,02	5640	5520	3,70	3,65	3,5
	6.2.2			39,66	5260	5580	3,30	3,50	
	6.2.3			40,02	5530	5810	3,45	3,65	

Tab. 17: Výpočet pevnosti v tlaku po 56 dnech

Příměs	Ozn.	Rozlití [mm]	l [mm]	b [mm]	F _{t56,1} [N]	F _{t56,2} [N]	f _{t56,1} [N/mm ²]	f _{t56,2} [N/mm ²]	Ø f _{t56} [N/mm ²]
Referenční vzorek	1.3.1	180	40	39,1	17800	17400	11,40	11,15	11,3
	1.3.2			39,92	17910	17790	11,20	11,15	
	1.3.3			40,2	18200	18200	11,30	11,30	
Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	2.3.1	175	40	39,92	21990	22230	13,75	13,90	13,7
	2.3.2			40,12	22270	21640	13,90	13,50	
	2.3.3			40,34	21680	21670	13,45	13,45	
Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	3.3.1	180	40	40,92	23200	22080	14,15	13,50	13,2
	3.3.2			40,02	21240	21780	13,25	13,60	
	3.3.3			40,78	21100	19570	12,95	12,00	
Popílek - 10%	4.3.1	177	40	40,34	21080	21790	13,05	13,50	13,3
	4.3.2			40,1	22150	21090	13,80	13,15	
	4.3.3			40,3	21820	20650	13,55	12,80	
Popílek - 20%	5.3.1	176	40	39,6	20480	20920	12,95	13,20	12,4
	5.3.2			40,22	19130	19290	11,90	12,00	
	5.3.3			39,62	19470	19490	12,30	12,30	
Antuka - 10%	6.3.1	176	40	40,38	8980	8710	5,55	5,40	5,4
	6.3.2			40,52	8730	9080	5,40	5,60	
	6.3.3			40,34	8080	8400	5,00	5,20	

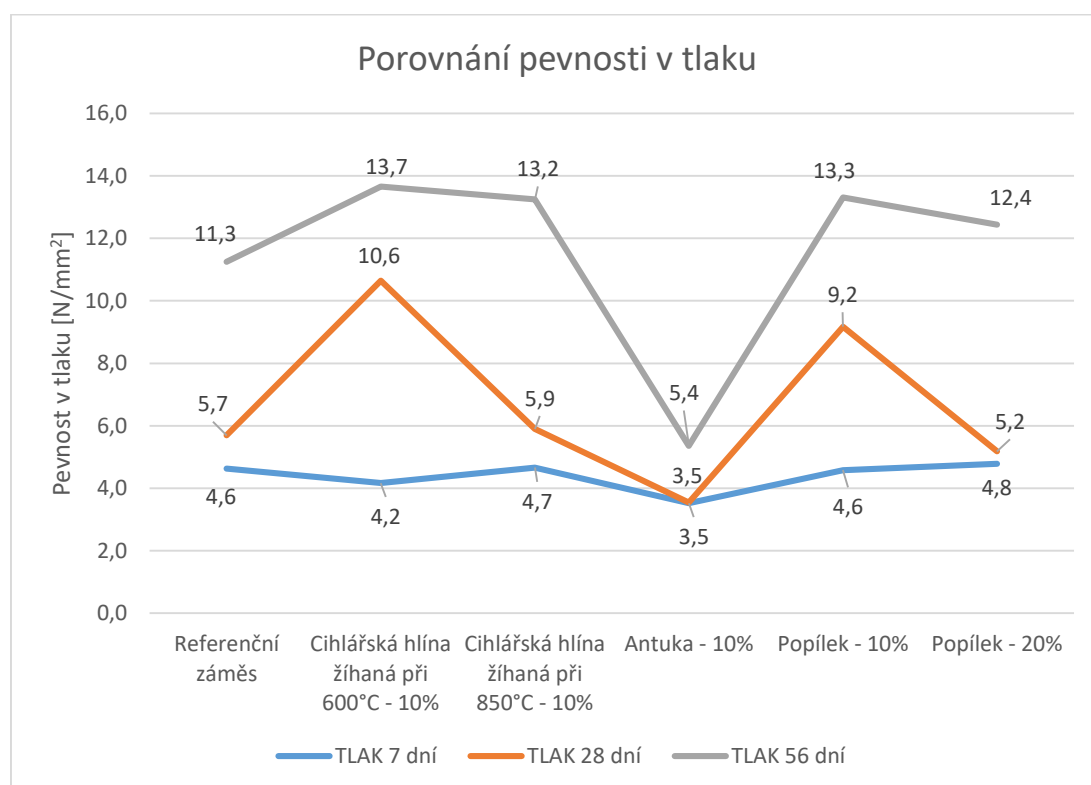
4.7.3 Porovnání pevnosti v tlaku

Z naměřených výsledků byl vytvořen graf závislosti pevnosti v tlaku na čase na jednotlivých záměsích (Graf 8,9,10,11,12,13,14).

Tab. 18: Porovnání pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku	F_{t7} [N/mm ²]	f_{t28} [N/mm ²]	f_{t56} [N/mm ²]
Referenční záměs	4,6	5,7	11,3
Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	4,2	10,6	13,7
Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	4,7	5,9	13,2
Antuka - 10%	3,5	3,5	5,4
Popílek - 10%	4,6	9,2	13,3
Popílek - 20%	4,8	5,2	12,4

Graf 8: Porovnání pevnosti v tlaku

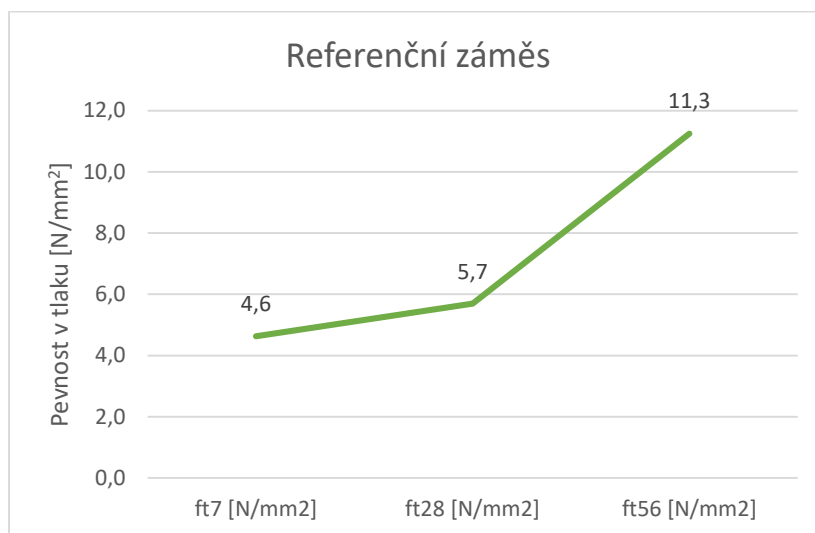


Z naměřených výsledků je patrné, obdobně jako při porovnávání pevnosti v tahu za ohybu, že přidavek cihlářské hlíny vypálené při 600 °C přispívá ke zvýšení pevnosti v tlaku. Použití cihlářské hlíny vypálené při větší teplotě však způsobuje výrazný pokles

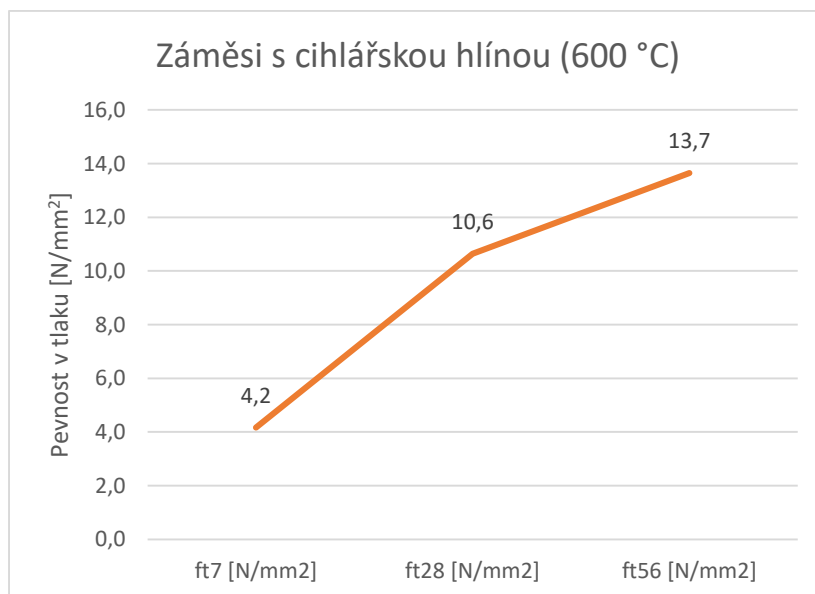
pevnosti. Nejmenší pevnost v tlaku má malta s antukou, u níž lze předpokládat, že byla vypálená na teplotu 1000 °C, což je běžná teplota výpalu cihel.

10% přídavek popílku do malty působí obdobně, jako cihlářská hlína vypálená při 600 °C. 20% přídavek popílku způsobuje nízký nárůst pevnosti v tlaku po 28 dnech, ale po 56 dnech dosahuje malta s touto příměsí již mnohem vyšší pevnosti, které se vyrovnají pevnostem malty s 10 % popílku a s 10 % cihlářské hlíny žíhané při 600 °C.

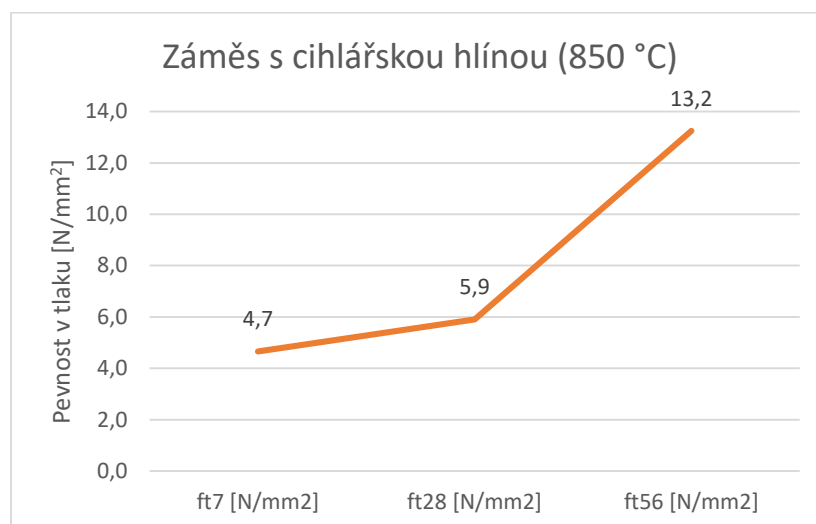
Graf 9: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu referenční záměsi



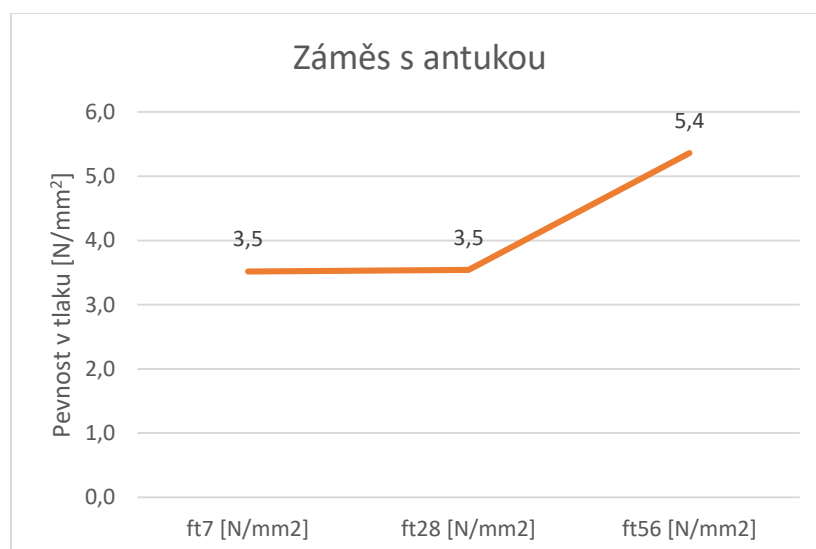
Graf 10: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s cihlářskou hlínou (600 °C)



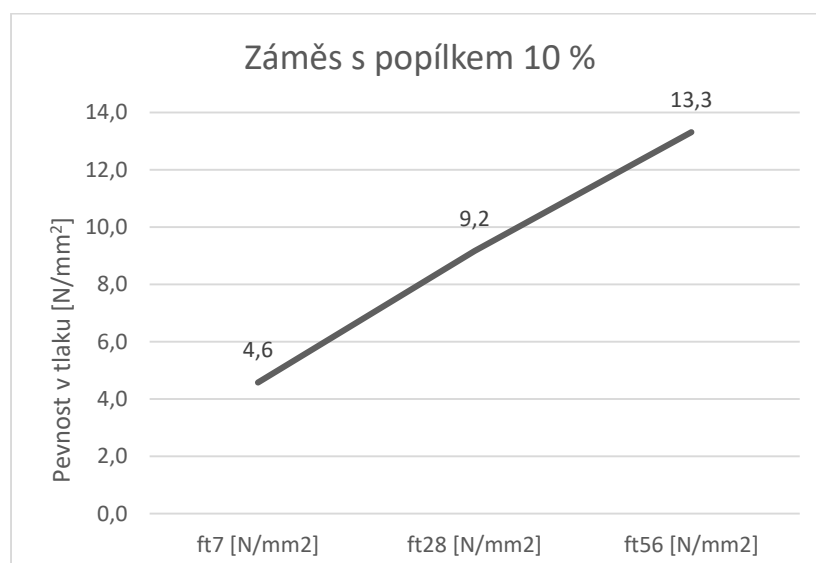
Graf 11: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s cihlářskou hlinou (850 °C)



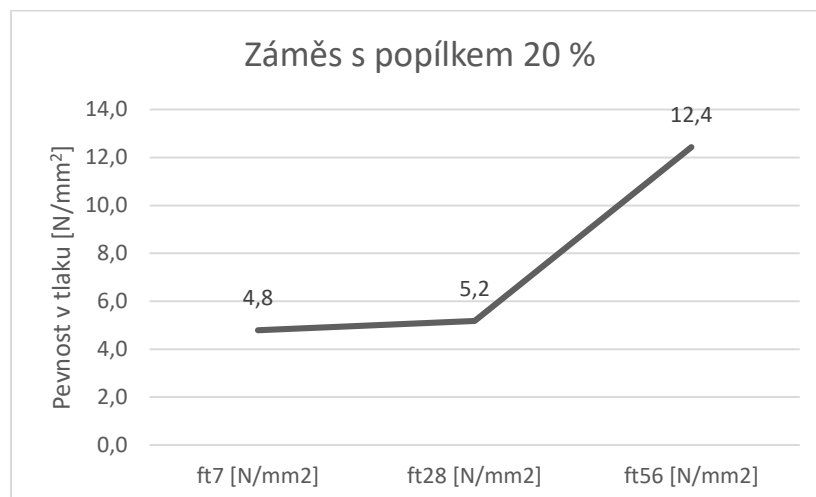
Graf 12: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s antukou



Graf 13: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s popínkem 10 %



Graf 14: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s popínkem 20 %



4.8 Stanovení objemové hmotnosti ztvrdlé malty

Objemová hmotnost byla stanovena výpočtem dle skutečných rozměrů a hmotnosti jednotlivých těles.

4.8.1 Postup zkoušky

- 1) Po 7, 28 a 56 dnech se vzorky vyjmou z igelitu. Změří se šířka b a výška d s přesností na 0,02 mm pomocí mechanického posuvného měřítka na všech vzorcích.
- 2) Všechny vzorky se také zváží na digitálních vahách s přesností na 1 g a změří se délka l pomocí pravítka s přesností na 0,5 mm.
- 3) Z naměřených hodnot se vypočte objemová hmotnost.

4.8.2 Vyjádření výsledků

Objemová hmotnost ρ (kg/m³) **každého zkušebního tělesa** se vypočítá podle vzorce (5):

$$\rho = \frac{m}{b \cdot d \cdot l} \quad (5)$$

kde ρ objemová hmotnost [kg/m³]

m hmotnost [g]

b, d rozměry zkušebních těles [mm]

l délka zkušební tělesa [mm]

Objemová hmotnost se uvede pro každé zkušební těleso s přesností na 1 kg/m³. Průměrná hodnota se vypočítá s přesností 10 kg/m³ a zapíše do tabulky (Tab. 19,20,21,22).

Tab. 19: Výpočet objemové hmotnosti ztvrdlé malty po 7 dnech

Příměs	Označení	b [mm]	d [mm]	l [mm]	m [g]	ρ_7 [kg/m ³]	$\emptyset\rho_7$ [kg/m ³]
Referenční vzorek	1.1.1	39,56	40,06	160,5	484	1903	1880
	1.1.2	40,3	40,08	160,5	477	1840	
	1.1.3	39,86	40,08	160	484	1893	
Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	2.1.1	40,96	39,76	160	486,7	1868	1890
	2.1.2	39,9	39,78	160,5	485,8	1907	
	2.1.3	40,6	39,82	160,5	489	1885	
Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	3.1.1	40,8	40,38	160,5	495	1872	1890
	3.1.2	40,76	40,16	160	495,5	1892	
	3.1.3	40,28	39,88	160,5	487,8	1892	
Popílek - 10%	4.1.1	39,96	40,46	160	493,5	1908	1900
	4.1.2	41,1	40,2	159,5	502,5	1907	
	4.1.3	41,46	40,28	159,5	501	1881	
Popílek - 20%	5.1.1	39,28	40,54	161	479,6	1871	1890
	5.1.2	39,52	40,14	160,5	485,7	1908	
	5.1.3	38,36	40,32	161	472,7	1898	
Antuka - 10%	6.1.1	40,56	40,28	159,5	496	1903	1930
	6.1.2	38,32	40,16	160	478	1941	
	6.1.3	38,14	40,36	160	477	1937	

Tab. 20: Výpočet objemové hmotnosti ztvrdlé malty po 28 dnech

Příměs	Označení	b [mm]	d [mm]	l [mm]	m [g]	ρ_{28} [kg/m ³]	$\emptyset\rho_{28}$ [kg/m ³]
Referenční vzorek	1.2.1	40,1	40,16	160,5	482	1865	1890
	1.2.2	39,56	40,08	160,5	485	1906	
	1.2.3	40,02	40,12	160,5	489	1898	
Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	2.2.1	39,72	40,14	159,5	485	1907	1910
	2.2.2	39,4	40,22	160	485	1913	
	2.2.3	39,2	40,26	160	482	1909	
Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	3.2.1	40,06	40,16	161	486	1876	1900
	3.2.2	39,04	40,24	161	481	1902	
	3.2.3	39,02	40,22	161	485	1919	
Popílek - 10%	4.2.1	40,68	39,48	160	499	1942	1920
	4.2.2	40,96	40,1	160,5	503	1908	
	4.2.3	41,26	40,08	160	503	1901	
Popílek - 20%	5.2.1	39,56	39,98	160	488	1928	1930
	5.2.2	39,98	40,08	160	496	1935	
	5.2.3	38,8	40,06	160	479	1926	
Antuka - 10%	6.2.1	38,02	40,28	160,5	483	1965	1930
	6.2.2	39,66	40,28	160,5	491	1915	
	6.2.3	40,02	39,98	160,5	487	1896	

Tab. 21: Výpočet objemové hmotnosti ztvrdlé malty po 56 dnech

Příměs	Označení	b [mm]	d [mm]	l [mm]	m [g]	ρ_{56} [kg/m ³]	$\phi\rho_{56}$ [kg/m ³]
Referenční vzorek	1.3.1	39,1	40,04	159,5	473	1894	1890
	1.3.2	39,92	40,22	159,5	483	1886	
	1.3.3	40,2	40,4	159	484	1874	
Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	2.3.1	39,92	40,02	160,5	490	1911	1910
	2.3.2	40,12	40,38	160,5	493	1896	
	2.3.3	40,34	40,12	160,5	497	1913	
Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	3.3.1	40,92	40,8	159	501	1887	1890
	3.3.2	40,02	41,08	159	495	1894	
	3.3.3	40,78	40,52	159	499	1899	
Popílek - 10%	4.3.1	40,34	40,28	159	490	1897	1900
	4.3.2	40,1	40,22	159	485	1891	
	4.3.3	40,3	40,28	159,5	492	1900	
Popílek - 20%	5.3.1	39,6	40,14	159	492	1947	1920
	5.3.2	40,22	40,26	159,5	485	1878	
	5.3.3	39,62	40,3	159,5	490	1924	
Antuka - 10%	6.3.1	40,38	40,4	160	497	1904	1910
	6.3.2	40,52	40,22	160	498	1910	
	6.3.3	40,34	40,18	160,5	497	1910	

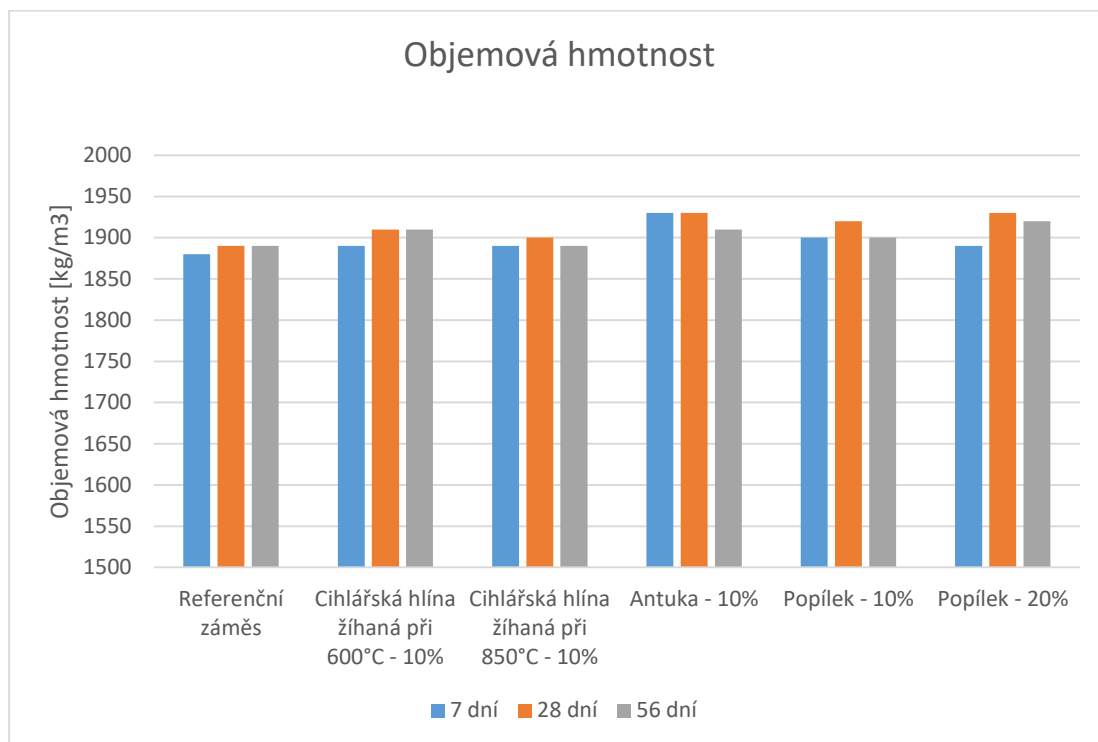
4.8.3 Porovnání objemové hmotnosti ztvrdlé malty

Z naměřených výsledků byl vytvořen graf závislosti objemové hmotnosti na čase na jednotlivých záměsích (Graf 15).

Tab. 22: Porovnání objemové hmotnosti ztvrdlé malty

Příměs	ρ_7 [kg/m ³]	ρ_{28} [kg/m ³]	ρ_{56} [kg/m ³]
Referenční záměs	1880	1890	1890
Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	1890	1910	1910
Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	1890	1900	1890
Antuka - 10%	1930	1930	1910
Popílek - 10%	1900	1920	1900
Popílek - 20%	1890	1930	1920

Graf 15: Porovnání objemové hmotnosti



Z naměřených hodnot je patrné, že druh příměsi a doba zrání nemá výrazný vliv na objemovou hmotnost.

4.9 Stanovení nasákavosti

Nasákavost se stanovuje dle normy ČSN EN 12808-5 [9].

4.9.1 Postup zkoušky

- 1) Proveďte se míchání zkušebních záměsů dle kapitoly 4.1.
- 2) Formy se nechají v laboratorním prostředí o teplotě 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti vzduchu 50 ± 5 %.
- 3) Po uplynutí 24 hodin od míchání se vzorky vyjmou z formy a nechají 27 dní zrán ve stejných podmínkách jako v bodě č.2.
- 4) Poté se tělesa zváží (m_d) a vloží do nádrže s vodou. Pro zajištění lepšího kontaktu vody s povrchem se pod tělesa vloží distanční podložky. Výška hladiny se po celou dobu zkoušky udržuje 5 až 10 mm od spodního okraje zkušebních vzorků.
- 5) Po 30 a 240 minutách se tělesa vyjmou z nádrže a zváží (m_t).

4.9.2 Vyjádření výsledků

Nasákavost W_{mt} (g) **každého zkušební tělesa** se vypočítá podle vzorce (6) dle normy ČSN EN 12808-5 [9]:

$$W_{mt} = m_t - m_d \quad (6)$$

kde	W_{mt}	nasákavost [g]
	m_t	hmotnost vzorku po ponoření [g]
	m_d	hmotnost suchého vzorku [g]

Nasákavost se uvede pro každé zkušební těleso s přesností na 0,1 g a запиše (Tab. 23,24).

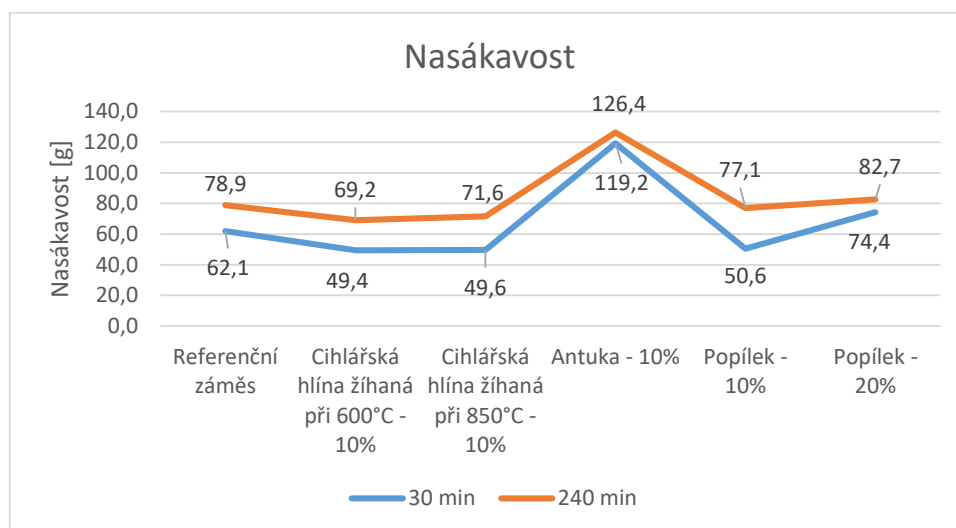
Tab. 23: Stanovení nasákavosti po 30 minutách

Značení vzorků	Druh příměsi	m_t [g]	m_d [g]	W_{mt} [g]	n_h [%]
1.3.n	Referenční záměs	572,2	510,1	62,1	12,2%
2.3.n	Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	571,3	521,9	49,4	9,5%
3.3.n	Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	576,2	526,6	49,6	9,4%
4.3.n	Popílek - 10%	552,8	502,2	50,6	10,1%
5.3.n	Popílek - 20%	578,6	504,2	74,4	14,8%
6.3.n	Antuka - 10%	597,0	477,8	119,2	24,9%

Tab. 24: Stanovení nasákavosti po 240 minutách

Značení vzorků	Druh příměsi	m_t [g]	m_d [g]	W_{mt} [g]	n_h [%]
1.3.n	Referenční záměs	589,0	510,1	78,9	15,5%
2.3.n	Cihlářská hlína žíhaná při 600°C - 10%	591,1	521,9	69,2	13,3%
3.3.n	Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	598,2	526,6	71,6	13,6%
4.3.n	Popílek - 10%	579,3	502,2	77,1	15,4%
5.3.n	Popílek - 20%	586,9	504,2	82,7	16,4%
6.3.n	Antuka - 10%	604,2	477,8	126,4	26,5%

Graf 16: Nasákavost jednotlivých vzorků v závislosti na čase



Nasákavost téměř všech malt má přibližně stejnou hodnotu (Graf 16). Výjimku tvoří malta s 10% přídatkem antuky, která má nasákavost po 30 i 240 minutách až 2x větší než ostatní malty.

4.10 Zkoušení pigmentu

V rámci diplomové práce proběhlo také porovnání zkušebních těles s určitým obsahem práškového pigmentu. Jedná se o tmavě červený, železitý pigment společnosti Precheza s obchodním názvem FEPREN TP303. Jeho barevnost způsobuje vysoký obsah Fe_2O_3 [28].

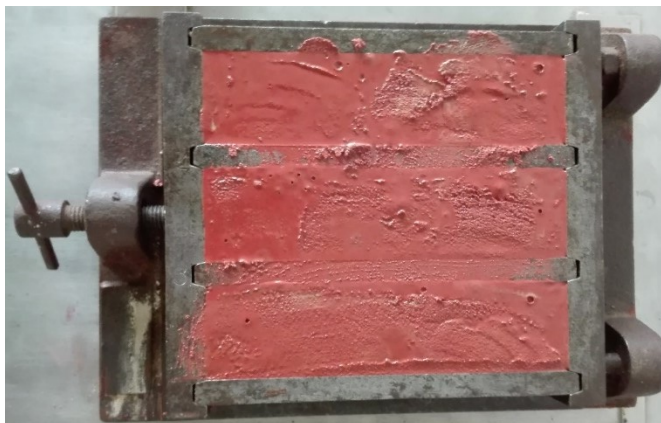
4.10.1 Postup zkoušky

Pro namíchání vzorků pro tuto zkoušku byly použity receptury těch záměsů, které dosahovaly ty nejlepší pevnostní vlastnosti, a to malta s 10% obsahem cihelné hmoty vyžíhané na 850 °C (Obr. 18) a malta s 10 % obsahem popílku (Tab. 25). Obsah pigmentu je vyjádřen jako procentuální poměr k hmotnosti cementu a příměsi.

Tab. 25: Přehled namíchaných záměsů s pigmentem

Značení vzorků	Druh příměsi	Obsah pigmentu [%]
7.1.m	Popílek - 10%	3,0%
7.2.m	Popílek - 10%	1,5%
7.3.m	Popílek - 10%	1,0%
8.1.m	Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	3,0%
8.2.m	Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	1,5%
8.3.m	Cihlářská hlína žíhaná při 850°C - 10%	1,0%

Po namíchání byla tělesa uchovávána ve vlhkém prostředí.



Obr. 18: Čerstvá malta s 10% obsahem cihelné hmoty a 3% přídavkem pigmentu

4.10.2 Vyjádření výsledků

Po 28 dnech od namíchání byly pořízeny fotografie (obr. 21,22) pro zhodnocení barevnosti malty a poté byly vzorky podrobeny pevnostním zkouškám.

Po vizuálním zhodnocení těchto 6 vzorků se nejlépe jeví vzorky s 3% přídavkem pigmentu do malt s obsahem cihelné hmoty i popílku. Tato barva je velmi výrazná a na fasádě historických staveb bude působit dojmem, že se jedná o cihelné zdivo.



Obr. 19: Zkušební vzorky s přídavkem cihelné hmoty vyžíhané na 850 °C a pigmentu (nahore – 3%, uprostřed – 1,5%, dole – 1%)



Obr. 20: Zkušební vzorky s přidavkem popílku a pigmentu (nahore – 3%, uprostřed – 1,5%, dole – 1%)

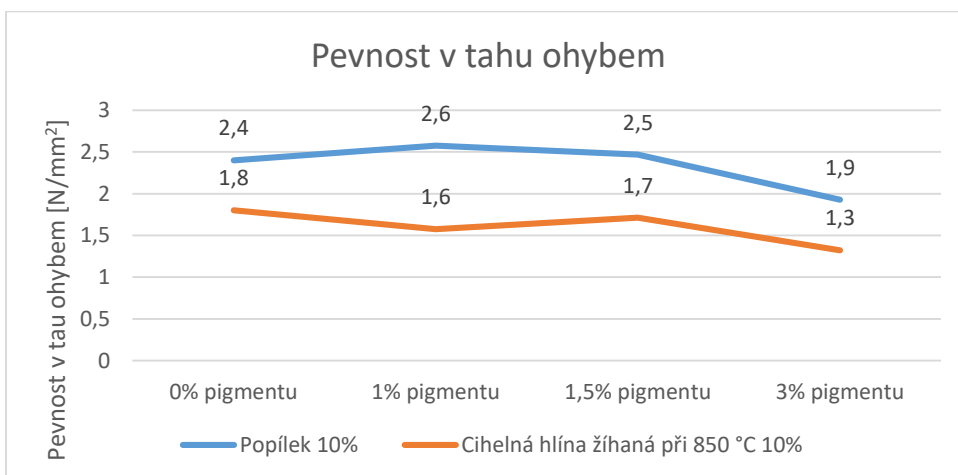
4.10.3 Porovnání pevností malt s přidavkem pigmentu

Z naměřených výsledků (Tab. 26, 27) byly vytvořeny grafy závislosti pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku na množství pigmentu (Graf 17,18).

Tab. 26: Porovnání pevnosti v tahu ohybem po 28 dnech malt s přidavkem pigmentu

Druh příměsi v maltě	0% pigmentu	1% pigmentu	1,5% pigmentu	3% pigmentu
Popílek 10%	2,4	2,6	2,5	1,9
Cihelná hlína žíhaná při 850 °C 10%	1,8	1,6	1,7	1,3

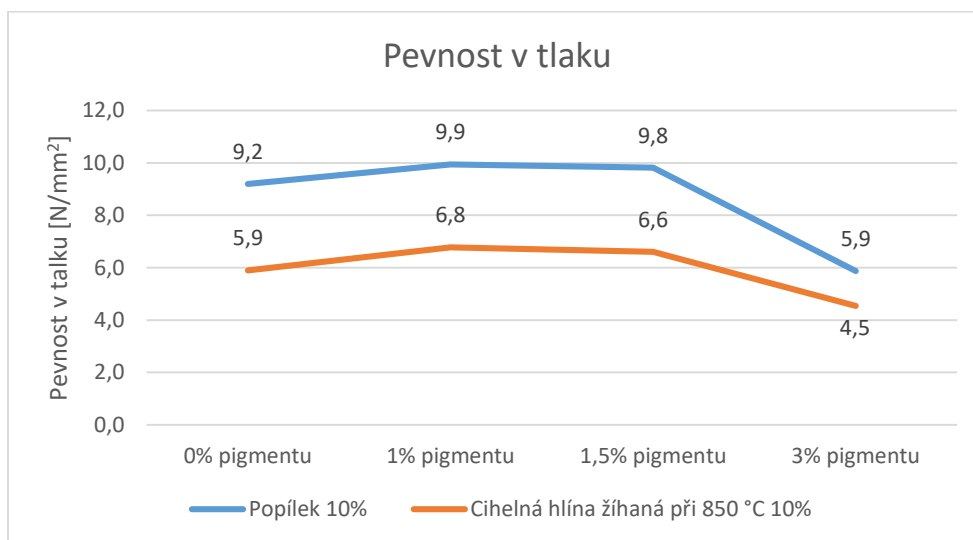
Graf 17: Porovnání pevnosti v tahu ohybem po 28 dnech malt s přidavkem pigmentu



Tab. 27: Porovnání pevnosti v tlaku po 28 dnech malt s přidavkem pigmentu

Druh příměsi v maltě	0% pigmentu	1% pigmentu	1,5% pigmentu	3% pigmentu
Popílek 10%	9,2	9,9	9,8	5,9
Cihelná hlína žíhaná při 850 °C 10%	5,9	6,8	6,6	4,5

Graf 18: Porovnání pevnosti v tlaku po 28 dnech malt s přidavkem pigmentu



Z naměřených výsledků vyplývá, že 1% a 1,5% přidavek železitého pigmentu FEPREN TP 303 se nijak výrazně neprojeví na pevnostech v tahu ohybem a v tlaku po 28 dnech. Problém však nastává při použití většího množství pigmentu, což výrazně snižuje pevnost v tlaku i pevnost v tahu ohybem.

4.11 Metodika analýzy vzorků

4.11.1 Rozsah použitých analýz

Z důvodu pochopení procesů hydratace byly vzorky podrobeny laboratorní analýze. Byl proveden makroskopický popis a dále byly použity metody jako optická mikroskopie, stanovení pH, infračervená spektrometrie a stanovení hydratačního tepla pomocí kalorimetrie. Rozsah použitých analýz udává přehledná tabulka (Tab. 28). Analyzovány byly také vstupní složky, které v předchozích kapitolách nebylo zapotřebí číslovat. Pro analýzu bylo proto vytvořeno speciální číslování, aby bylo stejné pro vstupní suroviny i namíchané směsi. Přehled číslování vzorků udává také tabulka (Tab. 28).

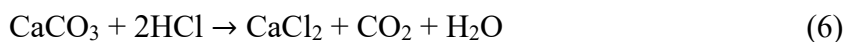
Tab. 28: Rozsah použitých analýz

Ozn. vzorku pro analýzu	Ozn. vzorku v předešlých kapitoly	Obsah vzorku	Reakce s 5% HCl	IČ spektrometrie	Optická mikroskopie	Stanovení pH	Kalorimetrie
16222-1	-	RC	x	x		x	x
16222-2	-	RC + tempo				x	x
16222-3	-	RC + tempo + 10% cihl. hmota žíhaná 850 °C					x
16 223	-	Popílek	x		x	x	
16 224	-	Antuka	x			x	
16 225	-	Cihelná hmota	x	x		x	
16 226	-	Cihelná hmota, žíhaná 600 °C	x	x		x	
16 227	-	Cihelná hmota, žíhaná 850 °C	x	x		x	
16 228	1.3.1	Hydratovaný RC	x	x	x		
16 229	2.3.1	Hydratovaný RC + 10% cihl. hmota, žíhaná 600 °C	x	x	x		
16 230	3.3.1	Hydratovaný RC + 10% cihl. hmota, žíhaná 850 °C	x		x		
16 231	4.3.1	Hydratovaný RC + popílek 10%	x		x		
16 232	5.3.1	Hydratovaný RC + popílek 20%	x	x	x		
16 233	6.3.1	Hydratovaný RC + antuka	x	x	x		

Poznámka k tabulce č. 28: Provedené analýzy jsou označeny symbolem x

4.11.2 Makroskopický popis vzorků a reakce s HCl

Makroskopický popis odebraného vzorku byl proveden před jeho zpracováním. Určuje se tloušťka vzorku, barva, celistvost, pevnost, obsah makropórů a další parametry. Sleduje se také reaktivita vzorku s 5% roztokem HCl. Při bouřlivé reakci je jasné, že vzorek obsahuje vápenec, který se tak rozpouští a uvolňuje CO₂ dle rovnice (6):



4.11.3 Fotodokumentace

Byla provedena fotodokumentace u zkušebních těles na čerstvém lomu v napadajícím světle při stejném zvětšení. Snímky jsou uvedeny jako obrázky č. 23 – 33.

Dále byl optickou polarizační mikroskopií v probíhajícím a polarizovaném světle analyzován popílek (16 223). Snímky jsou na obr. č. 21 a 22.

Vzorky byly pozorovány a snímány pomocí optického polarizačního mikroskopu Nikon s kamerou DS – Ri1 a softwarem pro analýzu obrazu.

4.11.4 Metoda infračervená spektrometrie

Pro tuto analýzu byl použitý FTIR spektrometr NICOLET 6700.

Infračervená spektrometrie je analytická technika, která se využívá pro identifikaci a strukturní charakterizaci chemických látek. Zkoušený vzorek absorbuje infračervené záření a dochází tak v něm ke změně vibračních stavů molekul. Využívá se střední infračervené oblasti, která je ohraničena kmitočty 4000-400 cm⁻¹. Výsledkem měření jsou infračervená spektra, která se porovnávají s knihovnou spekter nebo s publikovanými spektry a identifikují se tak funkční skupiny na základě charakteristických absorpčních pásů [27].

Při měření byla použita technika KBr tablety. Zkoušený vzorek o hmotnosti 0,2 mg se homogenizuje se 100 mg bromidu draselného ve vibračním mlýnku a lisováním se ze vzniklé směsi vytvoří tableta, která je použita pro měření ve spektrometru. Všechny vzorky jsou před analýzou drceny v achátové třecí misce na frakci pod 4 μm.

4.11.5 Metoda stanovení hodnoty pH ve vodném výluhu

Pro stanovení hodnoty pH byl připraven vodní výluh. Loužení probíhalo za občasného promíchání, následně byla změřena na filtrátu hodnota pH pomocí pH metru. Stanovení hodnoty pH ve vodném výluhu se provádí z důvodu potvrzení přítomnosti $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

4.11.6 Metoda stanovení hydratačního tepla - kalorimetrie

Kalorimetrie je disciplína, pomocí které se dají sledovat v průběhu měření různé tepelné změny. K měření byl použit izotermální kalorimetr TAM air.

Kalorimetrické měření se provedlo z důvodu zjištění vývinu hydratačního tepla románského cementu. Byly naplněny celkem 3 ampule s 5 g vzorku a 2,5 g vody. Ampule byly očištěny od nečistot a postupně zasouvány do přístroje. Měření probíhalo 72 hodin.

4.12 Výsledky analýzy vzorků

4.12.1 Makroskopický popis a reakce s 5% roztokem HCl

Z pevných vzorků byl připraven prášek pro zkoušení reakce s 5% roztokem HCl. Makroskopický popis a reaktivita s 5% roztokem HCl je uveden v tabulce (Tab. 29).

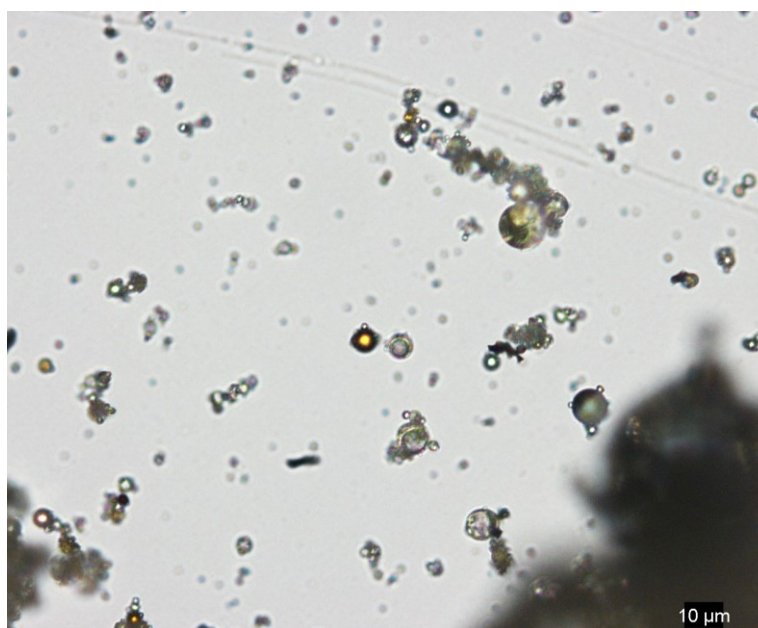
Tab. 29: Makroskopický popis vzorků pro analýzu

Označení vzorku	Obsah vzorku	Makroskopický popis	Obsah CaCO_3
16222-1	RC	velmi jemně mletý prášek, šedá barva	ANO
16 223	Popílek	jemně mletý prášek, šedá barva	NE
16 224	Antuka	jemně mletý prášek, tmavě oranžová barva, obsahuje shluky částecek o velikosti až 3 mm	NE
16 225	Cihlářská hlína	jemně mletý prášek, světle oranžová barva	NE
16 226	Cihlářská hlína (600 °C)	jemně mletý prášek, tmavě oranžová barva	NE
16 227	Cihlářská hlína (850 °C)	jemně mletý prášek, tmavě oranžová barva	NE
16 228	Hydratovaný RC	těleso kvádrového tvaru na jedné straně lom po zkoušce pevnosti v tahu ohybem, rozměry cca 40x40x60 mm, šedá až okrová barva, obsahuje povrchové póry (max. průměr 2,5 mm)	ANO

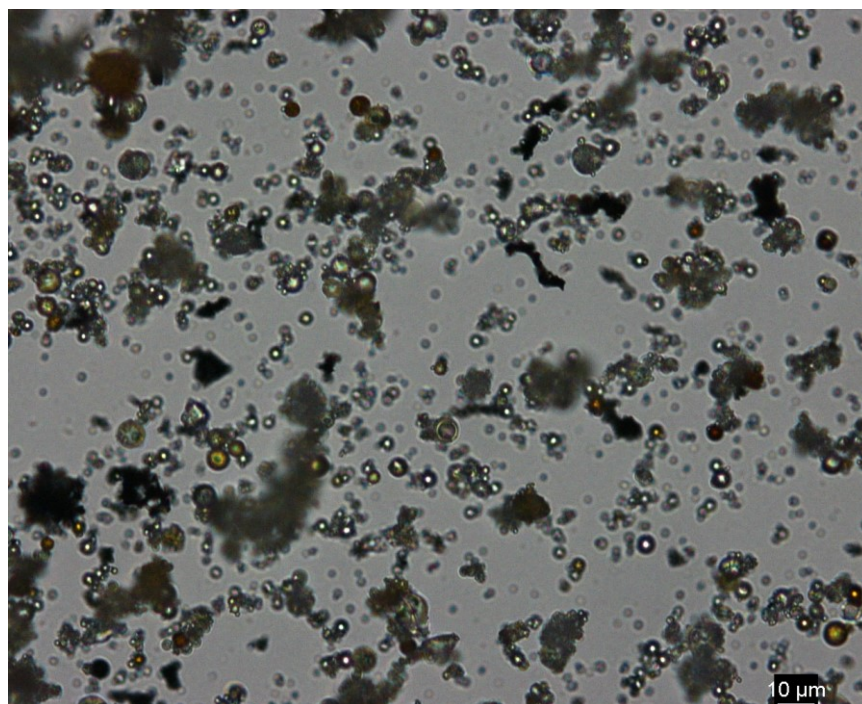
16 229	Hydratovaný RC + 10% cihl. hlína, žíhaná 600 °C	těleso kvádrového tvaru na jedné straně lom po zkoušce pevnosti v tahu ohybem, rozměry cca 40x40x65 mm, šedá až okrová barva, obsahuje povrchové póry (max. průměr 2 mm)	ANO
16 230	Hydratovaný RC + 10% cihl. hlína, žíhaná 850 °C	těleso kvádrového tvaru na jedné straně lom po zkoušce pevnosti v tahu ohybem, rozměry cca 40x40x75 mm, šedá až okrová barva, obsahuje povrchové póry (max. průměr 2 mm)	ANO
16 231	Hydratovaný RC + popílek 10%	těleso kvádrového tvaru na jedné straně lom po zkoušce pevnosti v tahu ohybem, rozměry cca 40x40x65 mm, šedá až okrová barva, obsahuje povrchové póry (max. průměr 2,5 mm)	ANO
16 232	Hydratovaný RC + popílek 20%	těleso kvádrového tvaru na jedné straně lom po zkoušce pevnosti v tahu ohybem, rozměry cca 40x40x80 mm, šedá až okrová barva, obsahuje povrchové póry (max. průměr 1,5 mm)	ANO
16 233	Hydratovaný RC + antuka	těleso kvádrového tvaru na jedné straně lom po zkoušce pevnosti v tahu ohybem, rozměry cca 40x40x80 mm, šedá až okrová barva a nádechem oranžového odstínu, obsahuje povrchové póry (max. průměr 1,5 mm)	ANO

4.12.2 Fotodokumentace a optická mikroskopie

Nejprve byl hodnocen vzorek popílku (16 223). Cílem optické mikroskopie popílku bylo zjistit, zda obsahuje vzorek mikrosféry, které tvoří sklovité fáze. Na snímcích (obr. 21,22) je patrné, že popílek obsahuje vysoký podíl mikrosfér pod 10 µm tvořených sklovitou fází. Tento typ popílku odpovídá popílku z elektrostatických odlučovačů.

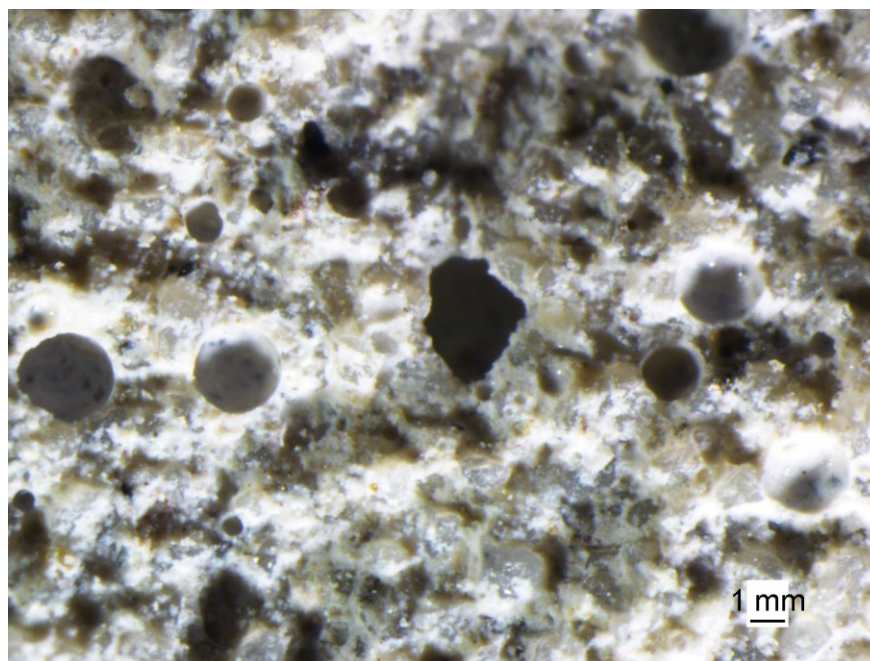


Obr. 21: Mikroskopický snímek vzorku 16 223 – elektrárnský popílek, elektrárna Dětmárovice. Optická mikroskopie v procházejícím světle. Měřítka je na snímku.



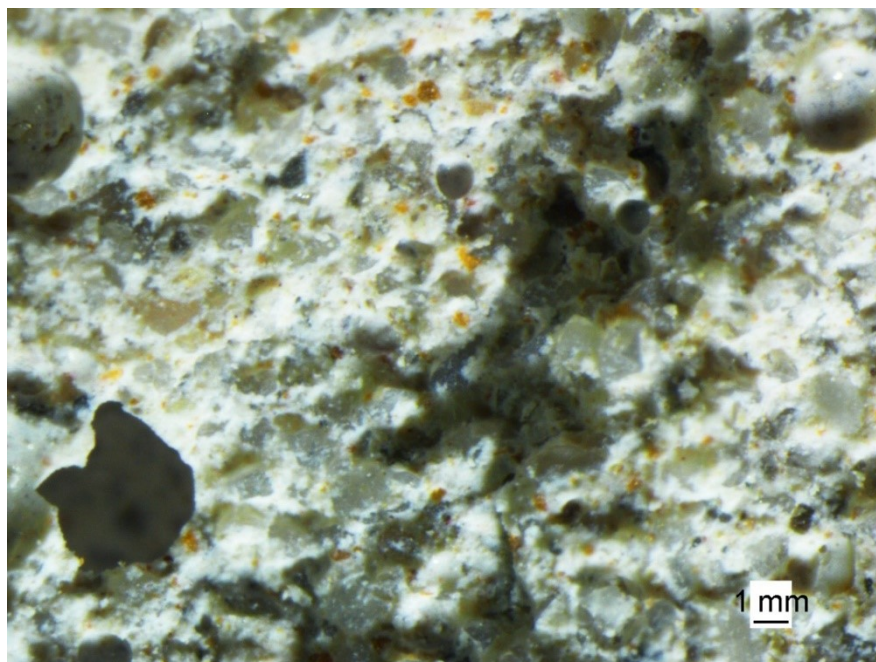
Obr. 22: Mikroskopický snímek vzorku 16 223 – elektrárenský popílek, elektrárna Dětmárovice. Optická polarizační mikroskopie. Šikmé nikoly. Měřítka je na snímku.

Byl vytvořen snímek (obr. 23) čerstvého lomu hydratovaného románského cementu (16 228). Rozložení vzdušných pórů na snímku je rovnoměrné. Maximální průměr vzdušných pórů je 3 mm. Jsou zde viditelná zrna drobného kameniva (křemičitý písek). Pojivo je světlé a dokonale obklopuje písková zrna. Jedná se o drsný lom.

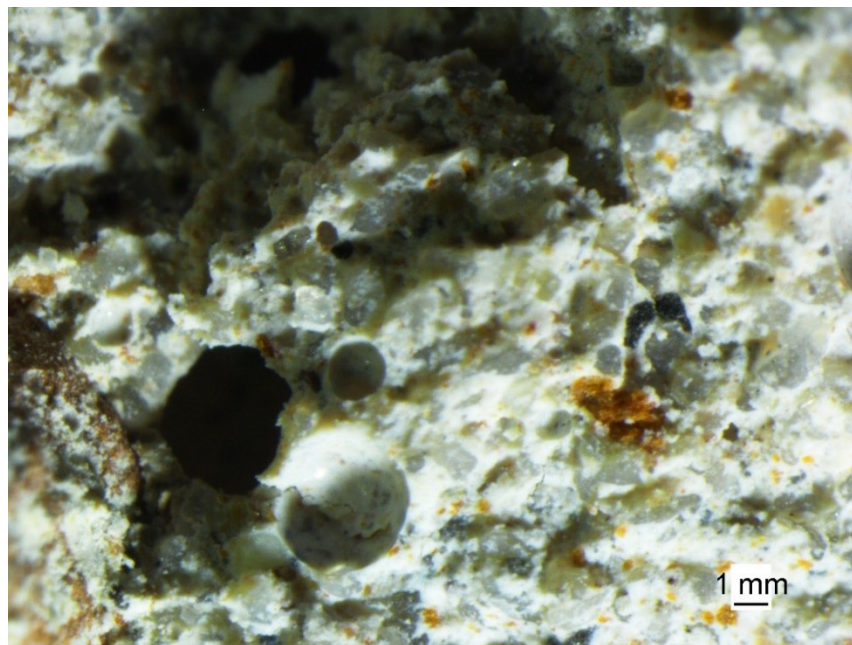


Obr. 23: Snímek vzorku 16 228. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.

Na dalších snímcích (obr. 24, 25) se nachází čerstvý lom hydratovaného románského cementu s 10% přídavkem cihelné hmoty žíhané při 600°C (16 228). Rozložení vzdušných pórů na snímcích je rovnoměrné. Maximální průměr vzdušných pórů je 4 mm. Jsou zde viditelná zrna drobného kameniva (křemičitý písek) a oranžové částice cihelné hmoty. Pojivo je světlé a dokonale obklopuje písková zrna. Jedná se o drsný lom.

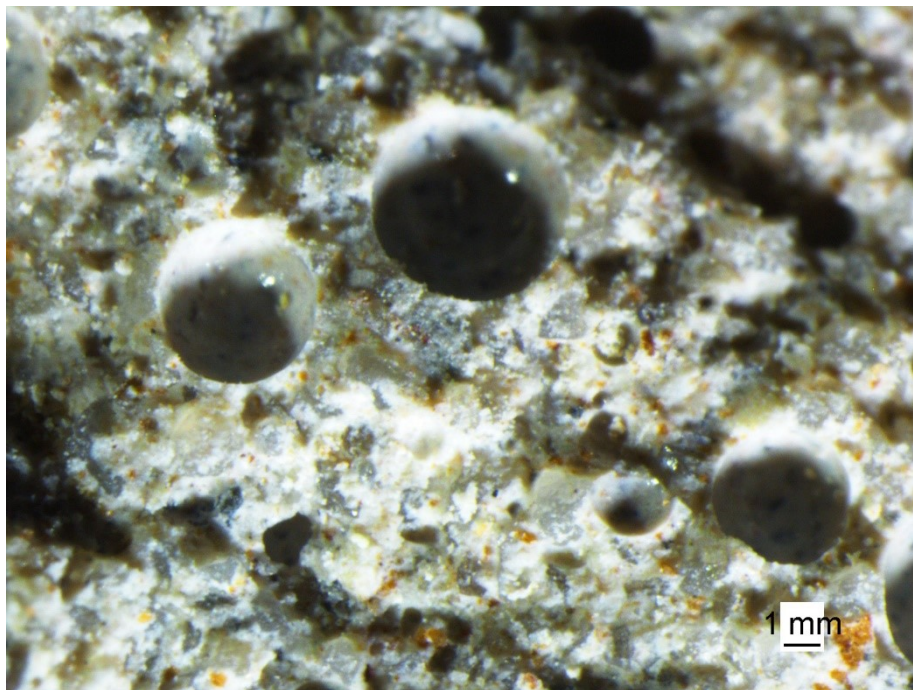


Obr. 24: Snímek vzorku 16 229. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + Cihelná hmota žíhaná při 600°C. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.

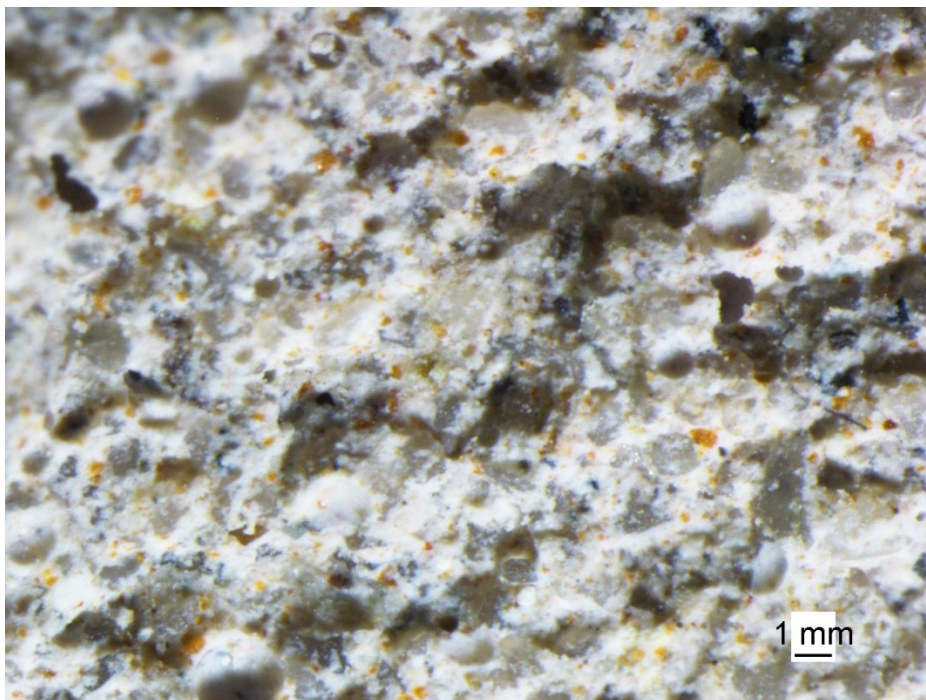


Obr. 25: Snímek vzorku 16 229. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + Cihelná hmota žíhaná při 600°C. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.

Na snímcích (obr. 26, 27) se nachází čerstvý lom hydratovaného románského cementu s 10% přídavkem cihelné hmoty žíhané při 850°C (16 230). Rozložení vzdušných pórů na snímcích je nerovnoměrné. Maximální průměr vzdušných pórů je 5,5 mm. Jsou zde viditelná zrna drobného kameniva (křemičitý písek) a oranžové částice cihelné hmoty. Pojivo je světlé a dokonale obklopuje písková zrna. Jedná se o drsný lom.

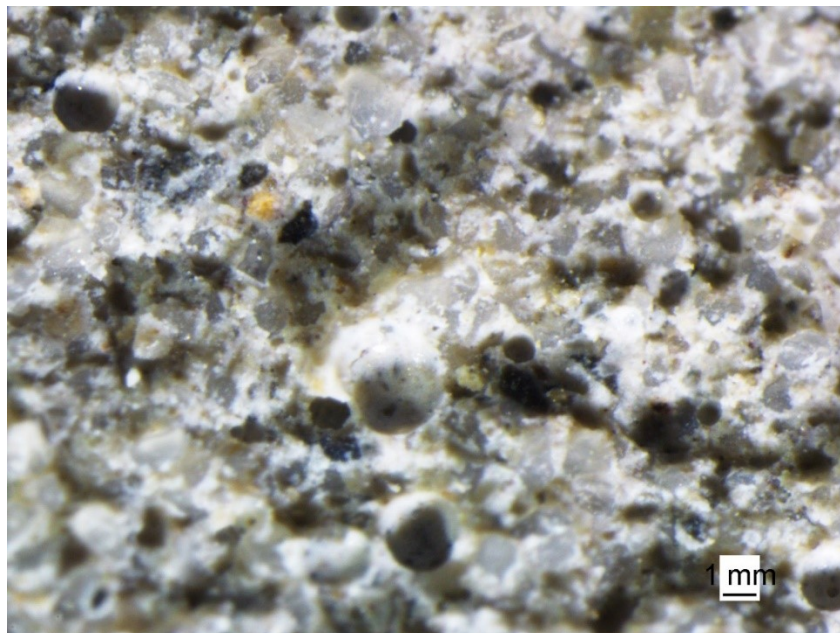


Obr. 26: Snímek vzorku 16 230. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + Cihelná hmota žíhaná při 850°C. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.

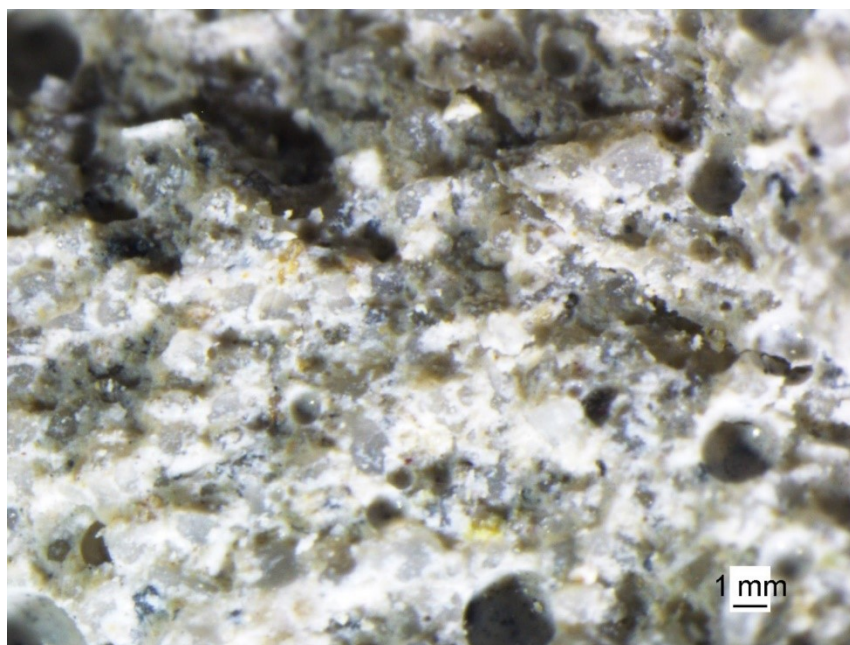


Obr. 27: Snímek vzorku 16 230. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + Cihelná hmota žíhaná při 850°C. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.

Na snímcích (obr. 28, 29) se nachází čerstvý lom hydratovaného románského cementu s 10% přídavkem popílku (16 231). Rozložení vzdušných pórů na snímcích je nerovnoměrné. Maximální průměr vzdušných pórů je 3 mm. Jsou zde viditelná zrna drobného kameniva (křemičitý písek). Pojivo je světlé a dokonale obklopuje písková zrna. Jedná se o drsný lom.

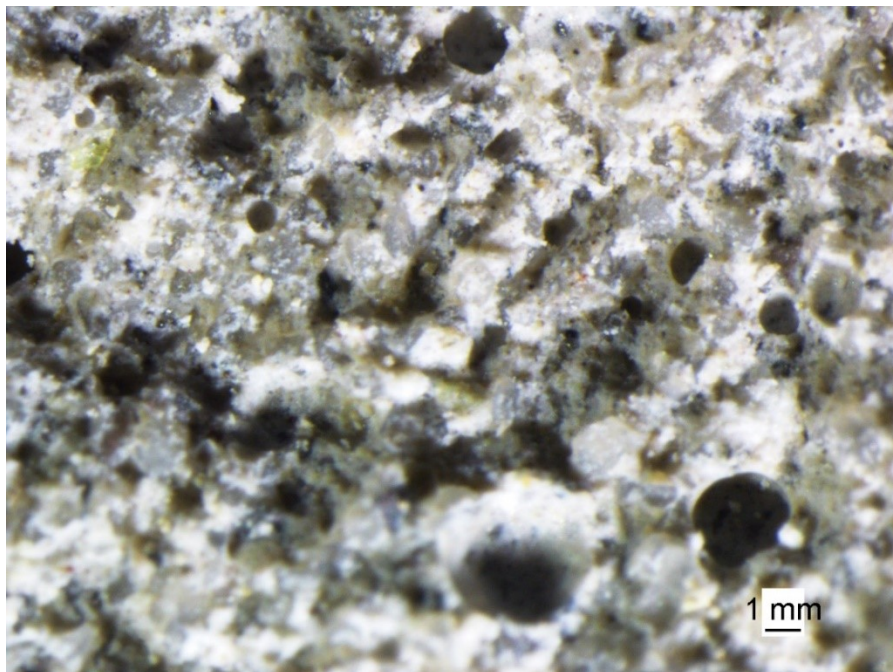


Obr. 28: Snímek vzorku 16 231. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + popílek 10%. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.

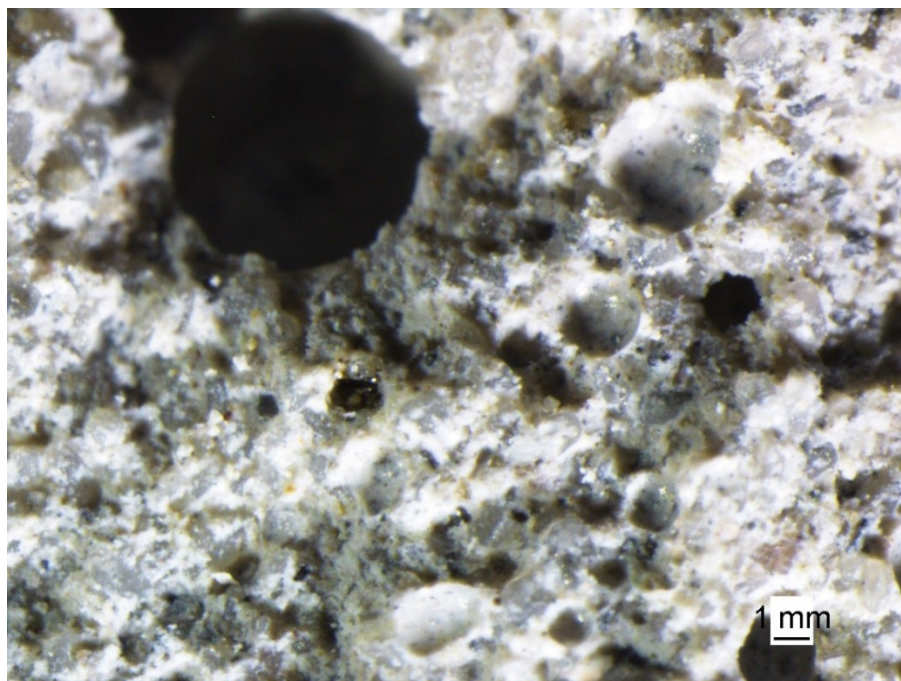


Obr. 29: Snímek vzorku 16 2231. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + popílek 10%. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.

Na snímcích (obr. 30, 31) se nachází čerstvý lom hydratovaného románského cementu s 20% přídavkem popílku (16 232). Rozložení vzdušných pórů na snímcích je nerovnoměrné. Maximální průměr vzdušných pórů je 6,5 mm. Jsou zde viditelná zrna drobného kameniva (křemičitý písek). Pojivo je světlé a dokonale obklopuje písková zrna. Jedná se o drsný lom.

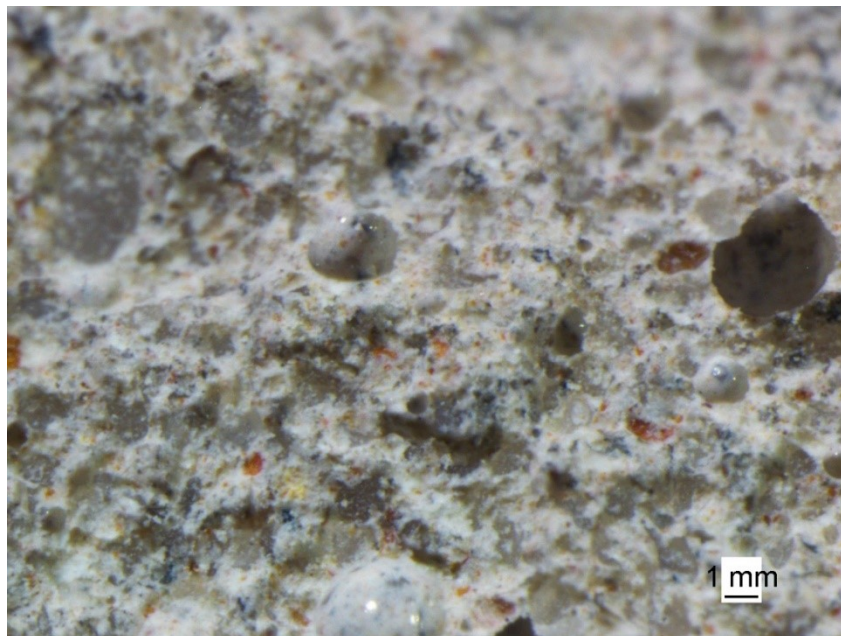


Obr. 30: Snímek vzorku 16 232. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + popílek 20%. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.

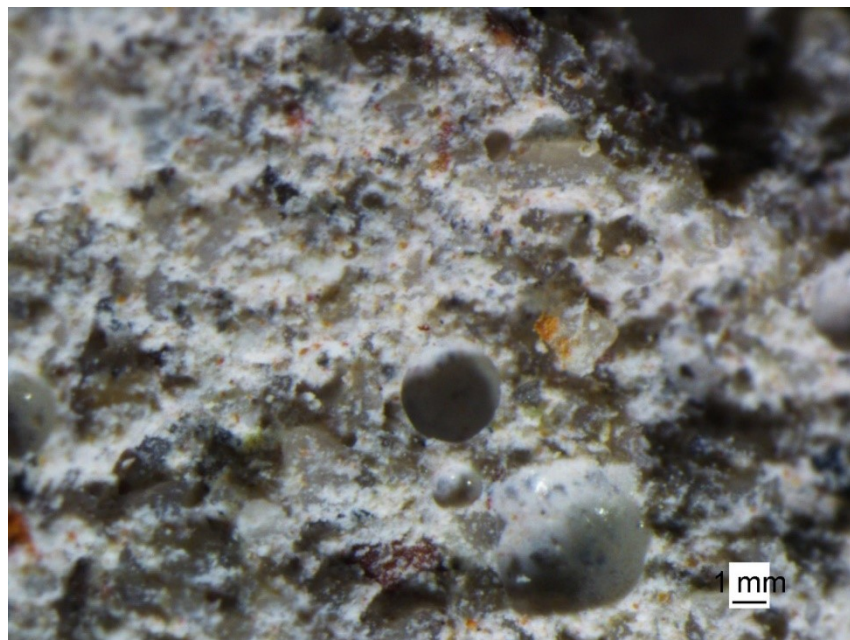


Obr. 31: Snímek vzorku 16 232. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + popílek 20%. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.

Na snímcích (obr. 32, 33) se nachází čerstvý lom hydratovaného románského cementu s 10% přidavkem antuky (16 233). Rozložení vzdušných pórů na snímcích je nerovnoměrné. Maximální průměr vzdušných pórů je 4 mm. Jsou zde viditelná zrna drobného kameniva (křemičitý písek) a částice antuky. Pojivo je světlé a dokonale obklopuje písková zrna. Jedná se o drsný lom.



Obr. 32: Snímek vzorku 16 233. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + antuka. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.



Obr. 33: Snímek vzorku 16 233. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + antuka. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.

4.12.3 Infračervená spektra jednotlivých vzorků

Infračervená spektra jsou uvedena v přílohách č. 1-8. Z naměřených spekter lze zjistit obsah chemických látek (Tab. 30) a na tomto základě vytvořit určité poznatky.

Tab. 30: Vyhodnocení infračervených spekter všech vzorků

Ozn. Vzorku	Obsah vzorku	CaCO ₃	Ca(OH) ₂	Q (křemen)	Anhydrit
16 222	RC	1421, 876, 713	3642		595, 613, 1118
16 225	Cihelná hmota			779, 795, (1087)	
16 226	Cihelná hmota žíhaná při 600 °C			779, 795	
16 227	Cihelná hmota žíhaná při 850 °C			778, 795, 1082	
16 228	Hydratovaný RC	1427, 876, 712		459, 512, 778, 795, 1085	
16 229	Hydratovaný RC + Cihelná hmota žíhaná při 600 °C 10%	1426, 876, 712		458, 512, 778, 795, 1083	
16 232	Hydratovaný RC + popílek 20%	1427, 876, 714		458, 512, 778, 797, 1083	
16 233	Hydratovaný RC + antuka 10%	1424, 876, 712		459, 510, 778, 792, 1085	

Je sledován vývoj při vypalování cihlářské hlíny (16 225, 16 226, 16 227). Vstupní cihlářská hlína před výpalem obsahuje směs jemnozrnného křemene, kaolinitu se špatnou krystanilitou a Illitu. Při výpalu na 600 °C dojde k vytvoření metakaolinitu, křemen zůstává nezměněný. Výpalem na 850 °C dochází k rekrystalizaci metakaolinitu a ke vzniku metaslíd.

Dle infračervené spektrometrie je spektrální obraz různě vypálených materiálů shodný a nedochází tak k výrazným posunům. Je tedy nepravděpodobné, že by se cihla zapojila významnou měrou do reakcí. Cihlářská hlína i antuka se nejspíš chová jako kamenivo a neúčastní se hydratace.

Je sledován také vývoj při hydrataci románského cementu (16 222, 16 228). Hydrataci startuje Al₂O₃ v podobě C₃A. Ten vytahuje sulfáty a nastává proces, který svým průběhem připomíná geopolymerní reakci.

Dle IČ spekter vytváří hydratační reakce u všech vzorků stejnou matici (stejná u RC bez příměs i s příměsí cihlářské hlíny a antuky). Malý rozdíl nastává v případě popílku (16 232 - Hydratovaný RC + 20% popílek), kdy je do systému vneseno větší množství SiO_2 , který je velmi reaktivní. Na spektru je vidět, že matrice tvořená geopolymérem je obohacená o CSH gel. K přesné identifikaci těchto dějů bychom museli udělat další velmi nákladné analýzy jako RTG difrakci, DSC TG analýzu či magnetickou rezonanci.

4.12.4 Stanovení hodnoty pH

Bylo provedeno stanovení hodnoty pH všech vzorků bez zpomalovače i s ním. Zásaditá hodnota pH je zaznamenána u románského cementu. Při přidavku zpomalovače Tempo tato hodnota mírně stoupá. Hodnota pH všech ostatních vzorků po přidání zpomalovače klesá do kyselého prostředí.

Tab. 31: Hodnota pH před a po přidání zpomalovače tuhnutí TEMPO

Označení vzorku	Obsah vzorku	pH	pH při přidání zpomalovače tuhnutí
16 222	RC	8,5	10
16 223	Popílek	10	7,5
16 224	Antuka	6	5,5
16 225	Cihelná hmota	5,5	2,5
16 226	Cihelná hmota žíhaná při 600 °C	5,5	2,5
16 227	Cihelná hmota žíhaná při 850 °C	6	3

4.12.5 Kalorimetrie

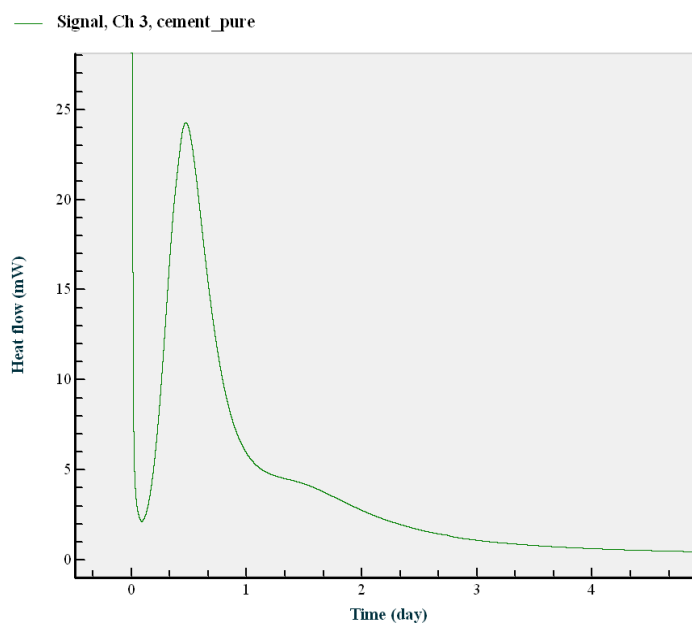
Nárůst hydratačního tepla RC (obr. 35) je porovnán s portlandským cementem (obr. 34).

Z grafů závislosti tepelného toku na čase lze vyčíst, že RC vyvíjí mnohem vyšší hydratační teplo než portlandský cement. Je to způsobeno vysokým obsahem aluminátů v RC. Přidavkem zpomalovače Tempo se tepelný tok zeslabí. Přídavek cihelné hmoty směs zředí, proto se vyvíjí podstatně menší hydratační teplo.

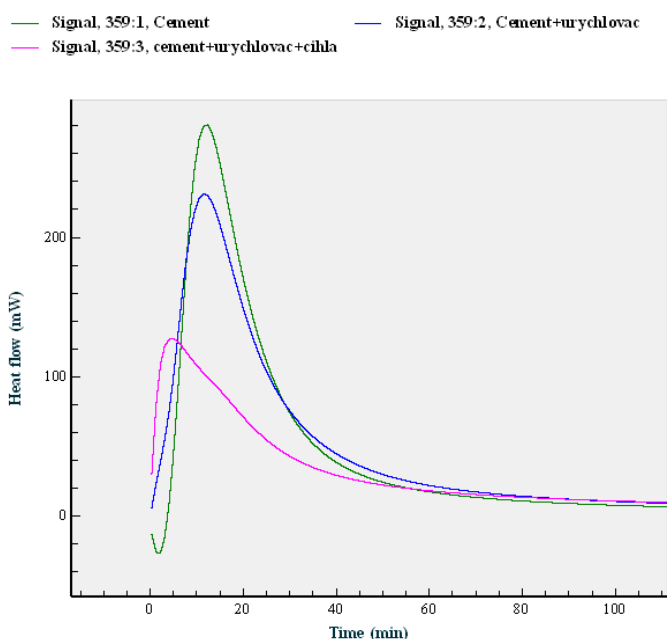
V první vzestupné fázi hydratace románského cementu je z grafu (obr. 35) zřejmá u všech záměs vysoká rychlost nárůstu tepelného toku, která trvá pouze několik minut.

Probíhá zde reakce C_3A se sulfáty za vzniku geopolymerního prostředí. Reakce probíhá především na povrchu zrn cementu, které jsou pokryty nově vzniklými hydratačními produkty.

V druhé fázi klesá hydratační rychlost a nastává hlavní hydratace C_2S . Tepelný tok se snižuje.



Obr. 34: Nárůst hydratačního tepla portlandského cementu 52,5



Obr. 35: Nárůst hydratačního tepla románského cementu (zelená – RC, modrá – RC+Tempo, růžová – RC+Tempo+cihlená hmotá žíhaná při 850 °C)

5. Závěr

Snaha o snižování spotřeby energie a emisí CO₂ při výrobě cementu neustále obrací pozornost výzkumu k cementům se zvýšeným obsahem belitu. Využití románského cementu, jehož teplota pálení probíhá při teplotách pod 1200 °C, je možným řešením pro tuhle problematiku. Jeho příznivé vlastnosti se dají využít nejen při restaurování památek. Problém však je ve vysoké ceně románského cementu, která několikanásobně převyšuje cenu běžně užívaných portlandských cementů.

Úkolem experimentální části této práce bylo nahradit část pojiva malty tvořeného románským cementem Prompt od firmy Vicat některým z široké škály stavebních nebo průmyslových odpadů. Z nabízeného sortimentu byl vybrán popílek z elektrostatických odlučovačů tepelné elektrárny Dětmarovice a cihlářská hlína z Cihelny Bratronice. Ta byla před aplikací do malty vypálena na 600 a 850 °C. Ze stejné cihelny byla použita také antuka, jejíž výpal mohl probíhat při teplotě kolem 1000 °C, což je běžná teplota výpalu cihel. Byla sledovaná kvalita vzniklých malt, která měla zůstat stejná jako při vytvoření referenční malty bez jakékoliv příměsi.

Na čerstvé maltě byla stanovena objemová hmotnost, obsah vzduchu a konzistence dle rozlití. Hodnoty rozlití byly porovnány s předepsanými hodnotami rozlití v ČSN EN 1015-2. Hodnota rozlití má být (175 ± 10) mm pro malty, které mají objemovou hmotnost větší než 1 200 kg/m³. Všechny malty tento požadavek splňují.

Románské cementy jsou známy vysokou rychlostí tuhnutí. Dle normy ČSN EN 196-1 byl naměřen počátek tuhnutí 7 minut. Po přidání zpomalovače tuhnutí Tempo dle předepsaného množství se počátek tuhnutí pohyboval u všech záměsí okolo 200 minut.

Na vzorcích ztvrdlé malty byla stanovena objemová hmotnost, pevnost v tahu ohybem, pevnost v tlaku a nasákavost. Dále byla provedena laboratorní analýza všech vzorků z důvodu pochopení hydratačních dějů.

Byl sledován vývoj při vypalování cihlářské hlíny dle spekter z Infračervené spektrometrie. Bylo zjištěno, že spektrální obraz různě vypálených materiálů je shodný a nedochází tak k výrazným posunům. Je tedy nepravděpodobné, že by se cihla zapojila významnou měrou do reakcí. Cihlářská hlína i antuka se nejspíš chová jako kamenivo a neúčastní se hydratace. Vzhledem k vysokému měrnému povrchu této hlíny, ale dochází k dokonalému vyplnění prostoru mezi zrny plniva malty a dojde tak k navýšení tlakové i tahové pevnosti, což bylo laboratorně ověřeno.

Je sledován také vývoj při hydrataci románského cementu. Hydrataci startuje Al_2O_3 v podobě C_3A . Ten vytahuje sulfáty a nastává proces, který svým průběhem připomíná geopolymerní reakci.

Dle IČ spekter vytváří hydratační reakce u vzorků s cihlářskou hlínou i antukou stejnou matici, jako u referenčního vzorku. Malý rozdíl nastává v případě popílku, kdy je do systému vneseno větší množství SiO_2 , který je velmi reaktivní. Na spektru je vidět, že matrice tvořená geopolymerem je obohacena o C-S-H gel. K přesné identifikaci těchto dějů bychom museli udělat další velmi nákladné analýzy jako RTG difrakci, DSC/TG analýzu či magnetickou rezonanci.

Na závěr byla experimentálně ověřena záměs malty s použitím příměsi komerčního anorganického červeného pigmentu na bázi oxidů železa. Z naměřených výsledků vyplývá, že 1% a 1,5% přídavek železitého pigmentu FEPREN TP 303 se nijak výrazně neprojeví na pevnostech v tahu ohybem a v tlaku po 28 dnech. Problém však nastává při použití většího množství pigmentu, což výrazně snižuje pevnost v tlaku i pevnost v tahu ohybem. Tato záměs může být, hypoteticky, použita jako sanační hmota pro neomítané režné zdivo.

Z naměřených výsledků vyplývá, že příměs průmyslových a stavebních odpadů v malém množství nijak významně nezhoršuje vlastnosti románského cementu, ale naopak, zvláště v případě popílku může příznivě ovlivnit výsledné mechanické pevnosti.

6. Seznamy

6.1 Seznam literárních a internetových zdrojů

- [1] ČSN EN 1015-2 (722400). *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 2: Odběr základních vzorků malt a příprava zkušebních malt*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [2] ČSN EN 1015-3 (722400). *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [3] ČSN EN 1015-6 (722400). *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [4] ČSN EN 1015-7 (722400). *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 7: Stanovení obsahu vzduchu v čerstvé maltě*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [5] ČSN EN 196-1 (722100). *Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2016.
- [6] ČSN EN 1015-11 (72 2400). *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdělých malt v tahu za ohybu a v tlaku*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [7] ČSN EN 998-1 ed. 2 (722401). *Specifikace malt pro zdivo – Část 1: Malta pro vnitřní a vnější omítky*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [8] ČSN-EN 197-1: ed. 2 (722101). *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [9] ČSN EN 12808-5 (72 2470). *Lepidla a spárovací malty pro keramické obkladové prvky - Část 5: Stanovení nasákavosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [10] KOLEKTIV AUTORŮ. *Románský cement - historie, vlastnosti a možnosti použití*. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek, seminář STOP, 2011. ISSN 1212-4168. Dostupné z: <http://www.rocare.eu/page/pdf/extern/Sbornik%20Romansky%20cement%20-%20historie,%20vlastnosti%20a%20moznosti%20pouziti.pdf>
- [11] SVOBODA, L. a kol. *Stavební hmoty*. 2. vydání. Jaga group, s.r.o., Bratislava 2007. 400s. ISBN 978-80-8076-057-1

- [12] TYDLIDÁT, V. TESÁREK, P. KUNCA, A. ČERNÝ, R. ROVNANÍKOVÁ. *Vliv mletého cihelného střepu jako pucolánové příměsi na vlastnosti vápenné omítky*. Stavební Obzor 8/2005. Dostupné z: <http://docplayer.cz/7684392-Stavebni-obzor-rocnik-14-cislo-08-2005.html>
- [13] HOŠEK J. a LOSOS L.: *Historické omítky*. Praha: Grada Publishing a.s., 2007, s. 167. ISBN 8024713950.
- [14] Hlaváč J.: *Základy technologie silikátů*. 2. upravené vydání Praha: SNTL, 1988. s. 449-450, 476-478.
- [15] ADÁMEK J., NOVOTNÝ B., KOUKAL J. *Stavební materiály*. Akademické nakladatelství CEM s.r.o. Brno 1997.
- [16] *Co je románský cement*. [online]. [cit. 02-02-2017]. Dostupné z: <http://www.vicat.cz/history.html>
- [17] *Micro Silica Powder*. [online]. [cit. 10-02-2017]. Dostupné z: <https://www.tradeindia.com/fp1730717/Micro-Silica-Powder.html>
- [18] *Popílek*. [online]. [cit. 28-02-2017]. Dostupné z: <http://www.silotransport.cz/popilek>
- [19] *Crushed brick*. [online]. [cit. 28-02-2017]. Dostupné z: <http://www.canteraselcerro.com/en/crushed-brick/>
- [20] *Románský cement - Autentické pojivo pro výzdobu fasád 19. století*. [online]. [cit. 28-02-2017]. Dostupné z: <http://www.remmers.cz/remmers-fachplanung/romansky-cement.htm>
- [21] *Roman cement for architectural restoration to new high standarts*. [online]. [cit. 02-03-2017]. Dostupné z: <http://www.rocare.eu/page/photogallery.php>
- [22] *Vicat*. [online]. [cit. 02-03-2017]. Dostupné z: <http://www.vicat.fr/Groupe-Vicat/Presentation/Un-groupe-des-hommes-et-des-femmes>
- [23] *Nízkoenergetická hydraulická pojiva vyrobená z druhotných materiálů*. [online]. [cit. 02-11-2017]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/11895-nizkoenergeticka-hydraulicka-pojiva-vyrobenaz-druhotnych-materialu>

- [24] *TECHNICAL SPECIFICATIONS: PROMPT NATURAL CEMENT THE ROMAN CEMENT OF GRENOBLE*. Grenoble: CENTRE TECHNIQUE LOUIS VICAT, 2007. [online]. [cit. 03-03-2017]. Dostupné z: http://www.romanportland.net/files/doc/cahier_technique_cr_cnp_eng.pdf
- [25] Škvára F.: *Technologie anorganických pojiv I*. Praha: VŠCHT, 1995. s. 6, 16-23, 55- 61.
- [26] KLISIŇSKA-KOPACZ, Anna; TIŠLOVA, Renata. The effect of composition of Roman cement repair mortars on their salt crystallization resistance and adhesion. *Procedia Engineering*, 2013, 57: 565-571.
- [27] *Návody k laboratornímu cvičení z instrumentální analýzy* [online]. [cit. 06-03-2017]. Dostupné z: https://fakulty.osu.cz/prf/rsk/uploaded/5043_Navody%20LCIA.pdf
- [28] *Železitý pigment FEPREN TP303*. Precheza. [online]. [cit. 02-03-2017]. Dostupné z: <https://www.precheza.cz/root/ke-stazeni/TDL/tld-fepren-tp303.pdf>
- [29] STANĚK, T. *Vztah parametrů přípravy belitického cementu a jeho hydraulických vlastností*. Brno, 2009. 85 s. Dizertační práce na Fakultě chemické Vysokého učení technického v Brně [online]. [cit. 02-10-2017]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=21096
- [30] Ludwig, U., Pöhlmann, R.: Investigation on the production of low lime portland cements. *Proceedings of the 8th Int. Congr. Chem. Cement*, Rio de Janeiro, 1986, Vol. 2, 363-371.
- [31] ŠULCOVÁ P., Trojan M., *Nové speciální pigmenty pro 21. století*. Sb. *Nové trendy v anorganické technologii 2005*. Praha, 2005. s. 60-67.
- [32] ROVNANÍKOVÁ, P.: *Materiály historických omítek*. In *Sborník konference: Obnova památek – 2004, Omítky historických budov*. [online] Praha. WTA CZ, 2004, [online]. [cit. 17-03-2017]. dostupné z www.studioaxis.cz/images/pamatky/rovnanikovapavla.doc.
- [33] *The history of Roman cement* [online]. [cit. 26-03-2017]. Dostupné z: <http://petrol.sci.muni.cz/eng/technolology/romancements/history.htm>

- [34] *Příměsi do betonu* [online]. [cit. 02-03-2017]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/primesi>
- [35] *Use of nano-silica to reduce setting time and increase early strength of concretes with high volumes of fly ash or slag.* [online]. [cit. 26-08-2017]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181100643X>
- [36] DELATTE, Norbert J. *Lessons from Roman cement and concrete. Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 2001, 127.3: 109-115.

6.2 Seznam tabulek

Tab. 1: Dělení pojiv dle hydraulického modulu [15]	16
Tab. 2: Značení slinkových minerálů	17
Tab. 3: Chemické složení Prompt cementu [24]	20
Tab. 4: Fázové složení Prompt cementu [24]	21
Tab. 5: Přehled namíchaných vzorků	31
Tab. 6: Klimatizování zkušebních těles	34
Tab. 7: Výpočet rozlití	35
Tab. 8: Výpočet objemové hmotnosti čerstvé malty	37
Tab. 9: Výsledky stanovení obsahu vzduchu jednotlivých záměsí	38
Tab. 10: Vyjádření výsledků počátku a konce tuhnutí	40
Tab. 11: Výpočet pevnosti v tahu za ohybu po 7 dnech	42
Tab. 12: Výpočet pevnosti v tahu za ohybu po 28 dnech	43
Tab. 13: Výpočet pevnosti v tahu za ohybu po 56 dnech	43
Tab. 14: Porovnání pevnosti v tahu za ohybu	44
Tab. 15: Výpočet pevnosti v tlaku po 7 dnech	48
Tab. 16: Výpočet pevnosti v tlaku po 28 dnech	49
Tab. 17: Výpočet pevnosti v tlaku po 56 dnech	49
Tab. 18: Porovnání pevnosti v tlaku	50
Tab. 19: Výpočet objemové hmotnosti ztvrdlé malty po 7 dnech	54
Tab. 20: Výpočet objemové hmotnosti ztvrdlé malty po 28 dnech	54
Tab. 21: Výpočet objemové hmotnosti ztvrdlé malty po 56 dnech	55
Tab. 22: Porovnání objemové hmotnosti ztvrdlé malty	55
Tab. 23: Stanovení nasákavosti po 30 minutách	57

Tab. 24: Stanovení nasákavosti po 240 minutách	57
Tab. 25: Přehled namíchaných záměsí s pigmentem	58
Tab. 26: Porovnání pevnosti v tahu ohybem po 28 dnech malt s přídavkem pigmentu	60
Tab. 27: Porovnání pevnosti v tlaku po 28 dnech malt s přídavkem pigmentu	61
Tab. 28: Rozsah použitých analýz.....	62
Tab. 29: Makroskopický popis vzorků pro analýzu	64
Tab. 30: Vyhodnocení infračervených spekter všech vzorků	72
Tab. 31: Hodnota pH před a po přidání zpomalovače tuhnutí TEMPO.....	73

6.3 Seznam obrázků

Obr. 1: Fasáda domu restaurovaná maltou pojenou románským cementem [20].....	14
Obr. 2: Fotografie z rastrovacího elektronového mikroskopu, lomová plocha vzorku, omítka z objektu Kulissendepot ve Vidni, Porézní mikrostruktura historické malty z románského cementu s poměrně velkými destičkovitými produkty hydratace [10].	19
Obr. 3: Kostel Svatého Bruna, Grenoble, 1970 [21].....	20
Obr. 4: Ukázka napodobování kamene maltou s použitím Prompt cementu [16]	22
Obr. 5: Restaurování gotické památky [16]	22
Obr. 6.: Křemičitý úlet [17].....	27
Obr. 7.: Popílek [18].....	27
Obr. 8: Cihelná drť [19]	28
Obr. 9: Receptura dle výrobce.....	32
Obr. 10: Klimatická komora CTS C-40/1000/S.....	33
Obr. 11: Měření rozlití čerstvé malty	35
Obr. 12: Měřicí nádoba pro stanovení obsahu vzduchu a objemové hmotnosti	36
Obr. 13: Víko kalibrovaného tlakoměru pro stanovení obsahu vzduchu.....	38
Obr. 14: Vicatův přístroj při stanovení normální hustoty (vlevo), počátku tuhnutí (uprostřed) a konce tuhnutí (vpravo)	40
Obr. 15: Měření rozměrů zkušebních těles pomocí posuvného měřítka.....	41
Obr. 16: Zkušební těleso po zatěžování ohybem	41
Obr. 17: Zatěžování zkušebního tělesa pro stanovení pevnosti v tlaku	47
Obr. 18: Čerstvá malta s 10% obsahem cihelné hmoty a 3% přídavkem pigmentu	59
Obr. 19: Zkušební vzorky s přídavkem cihelné hmoty vyžíhané na 850 °C a pigmentu (nahore – 3%, uprostřed – 1,5%, dole – 1%)	59

Obr. 20: Zkušební vzorky s přídavkem popílku a pigmentu (nahore – 3%, uprostřed – 1,5%, dole – 1%).....	60
Obr. 21: Mikroskopický snímek vzorku 16 223 – elektrárenský popílek, elektrárna Dětmárovice. Optická mikroskopie v procházejícím světle. Měřítka je na snímku.....	65
Obr. 22: Mikroskopický snímek vzorku 16 223 – elektrárenský popílek, elektrárna Dětmárovice. Optická polarizační mikroskopie. Šikmé nikoly. Měřítka je na snímku.....	66
Obr. 23: Snímek vzorku 16 228. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.....	66
Obr. 24: Snímek vzorku 16 229. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + Cihelná hmota žíhaná při 600°C. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.....	67
Obr. 25: Snímek vzorku 16 229. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + Cihelná hmota žíhaná při 600°C. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.....	67
Obr. 26: Snímek vzorku 16 230. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + Cihelná hmota žíhaná při 850°C. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.....	68
Obr. 27: Snímek vzorku 16 230. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + Cihelná hmota žíhaná při 850°C. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.....	68
Obr. 28: Snímek vzorku 16 231. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + popílek 10%. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.....	69
Obr. 29: Snímek vzorku 16 231. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + popílek 10%. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.	69
Obr. 30: Snímek vzorku 16 232. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + popílek 20%. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.....	70
Obr. 31: Snímek vzorku 16 232. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + popílek 20%. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.....	70
Obr. 32: Snímek vzorku 16 233. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + antuka. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.....	71
Obr. 33: Snímek vzorku 16 233. Čerstvý lom z tělesa hydratovaného RC + antuka. Makrofotografie. Měřítka je na snímku.....	71
Obr. 34: Nárůst hydratačního tepla portlandského cementu 52,5	74
Obr. 35: Nárůst hydratačního teplat románského cementu (zelená – RC, modrá – RC+Tempo, růžová – RC+Tempo+cihelná hmota žíhaná při 850 °C)	74

6.4 Seznam grafů

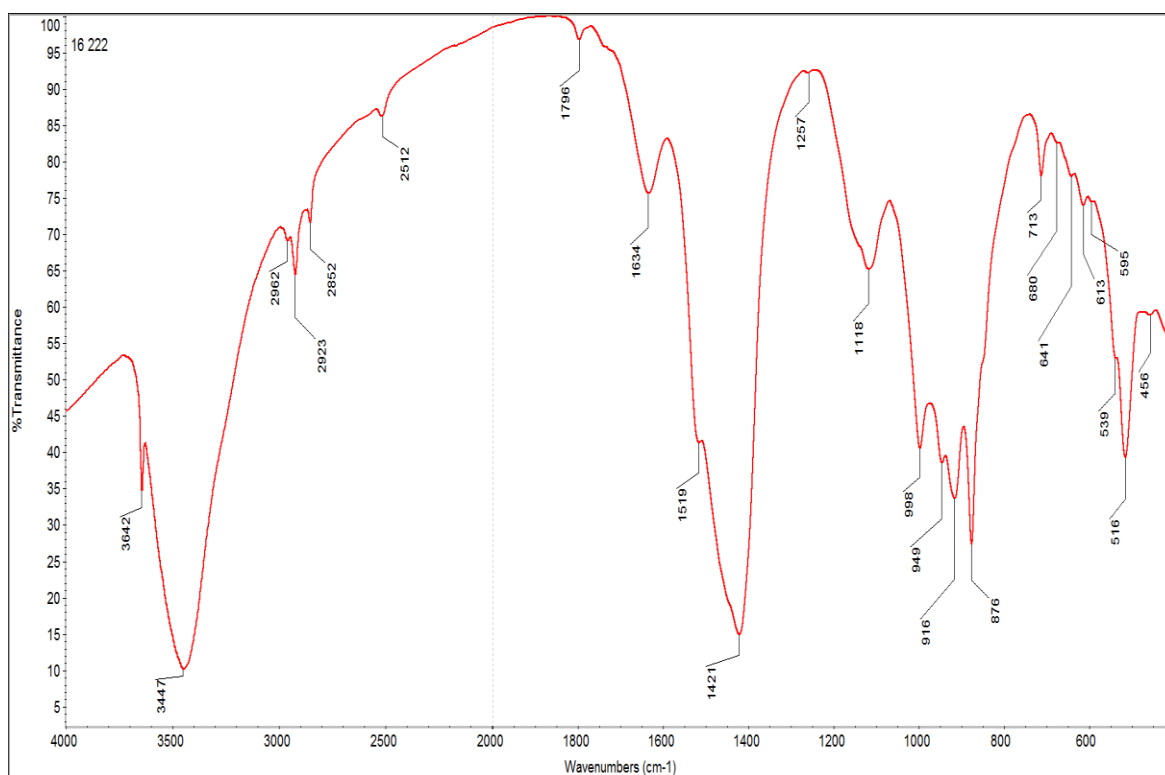
Graf 1: Porovnání pevnosti v tahu za ohybu	44
Graf 2: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu referenční záměsi	45
Graf 3: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s cihlářskou hlinou (600 °C)	45
Graf 4: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s cihlářskou hlinou (850 °C)	45
Graf 5: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s antukou	46
Graf 6: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s popínkem 10 %.....	46
Graf 7: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s popínkem 20 %.....	46
Graf 8: Porovnání pevnosti v tlaku	50
Graf 9: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu referenční záměsi	51
Graf 10: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s cihlářskou hlinou (600 °C)	51
Graf 11: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s cihlářskou hlinou (850 °C)	52
Graf 12: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s antukou	52
Graf 13: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s popínkem 10 %.....	52
Graf 14: Nárůst pevnosti v tahu za ohybu záměsi s popínkem 20 %.....	53
Graf 15: Porovnání objemové hmotnosti	56
Graf 16: Nasákavost jednotlivých vzorků v závislosti na čase	58
Graf 17: Porovnání pevnosti v tahu ohybem po 28 dnech malt s přidavkem pigmentu.....	60
Graf 18: Porovnání pevnosti v tlaku po 28 dnech malt s přidavkem pigmentu	61

6.5 Seznam příloh

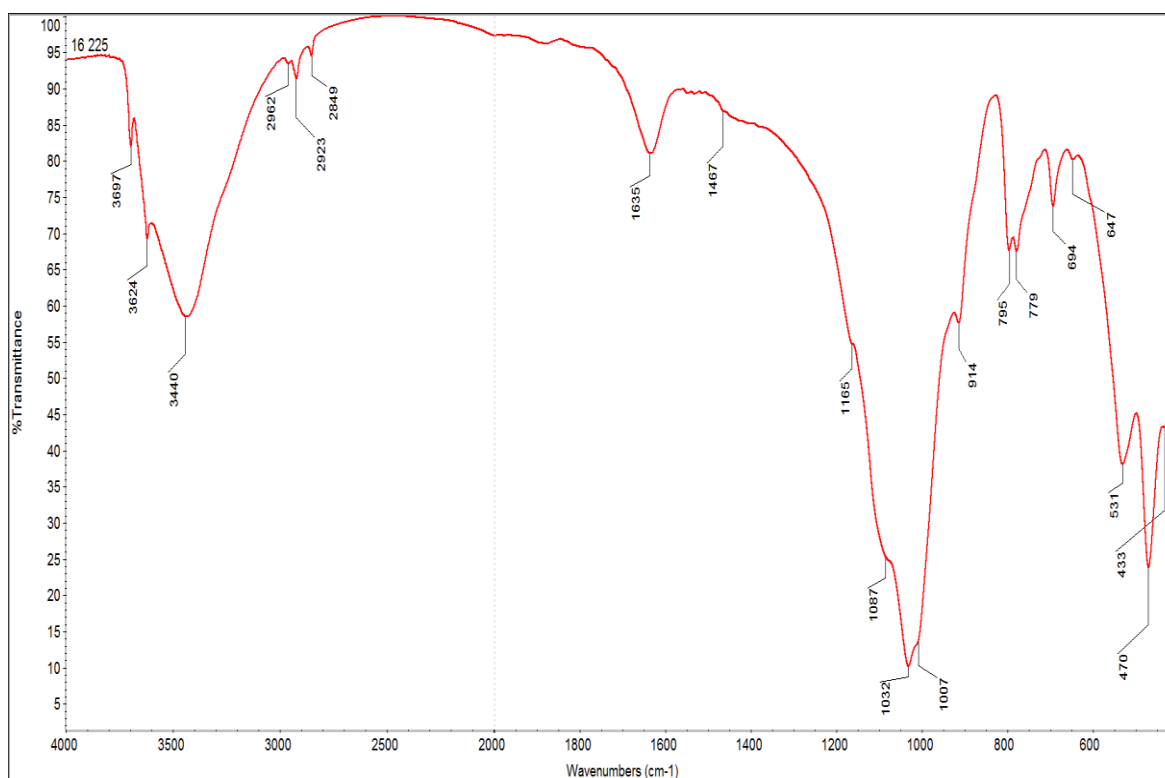
Příloha 1: Infračervené spektrum vzorku 16 222 (Románský cement).....	84
Příloha 2: Infračervené spektrum vzorku 16 225 (Cihelná hmota).....	84
Příloha 3: Infračervené spektrum vzorku 16 226 (Cihelná hmota vyžíhaná při 600 °C)	85
Příloha 4: Infračervené spektrum vzorku 16 227 (Cihelná hmota vyžíhaná při 850 °C)	85
Příloha 5: Infračervené spektrum vzorku 16 228 (Hydratovaný RC)	86
Příloha 6: Infračervené spektrum vzorku 16 229 (Hydratovaný RC + cihelná hmota 600°C).....	86
Příloha 7: Infračervené spektrum vzorku 16 232 (Hydratovaný RC + 20% popílek)...87	
Příloha 8: Infračervené spektrum vzorku 16 233 (Hydratovaný RC + antuka)	87

7. Přílohy

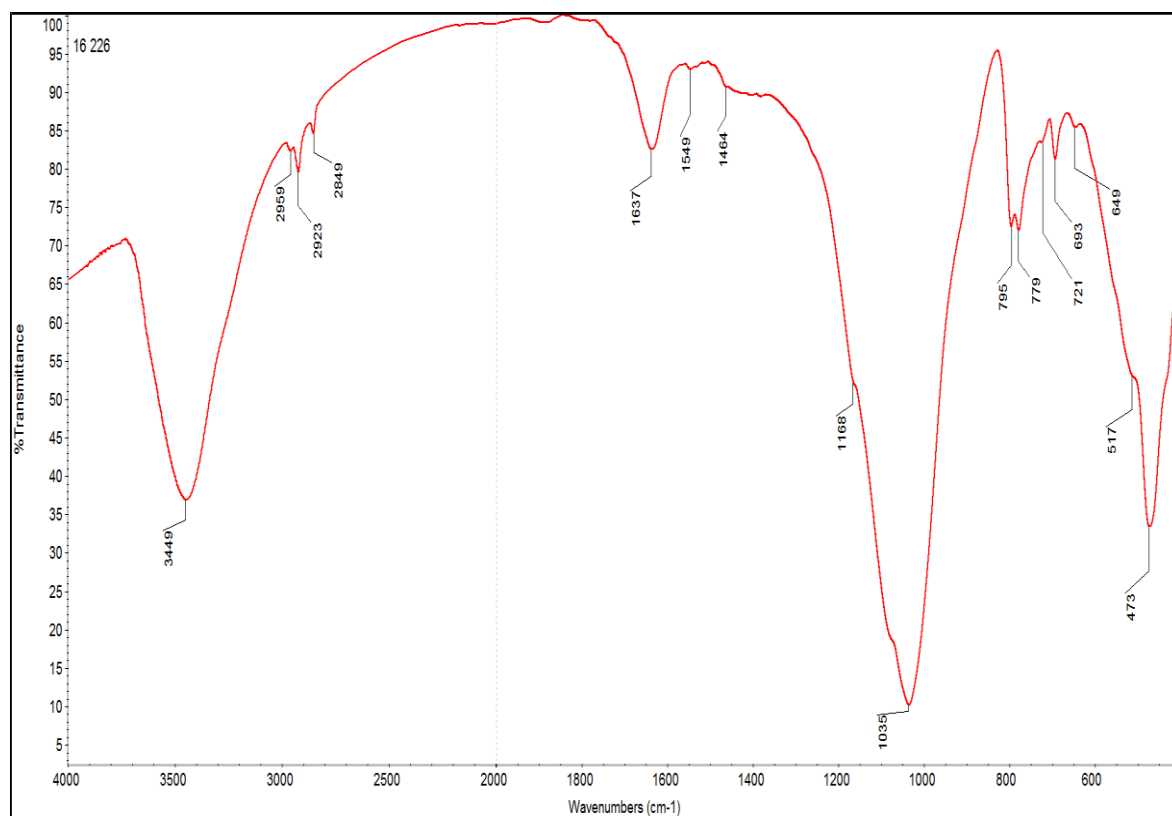
Příloha 1: Infračervené spektrum vzorku 16 222 (Románský cement)



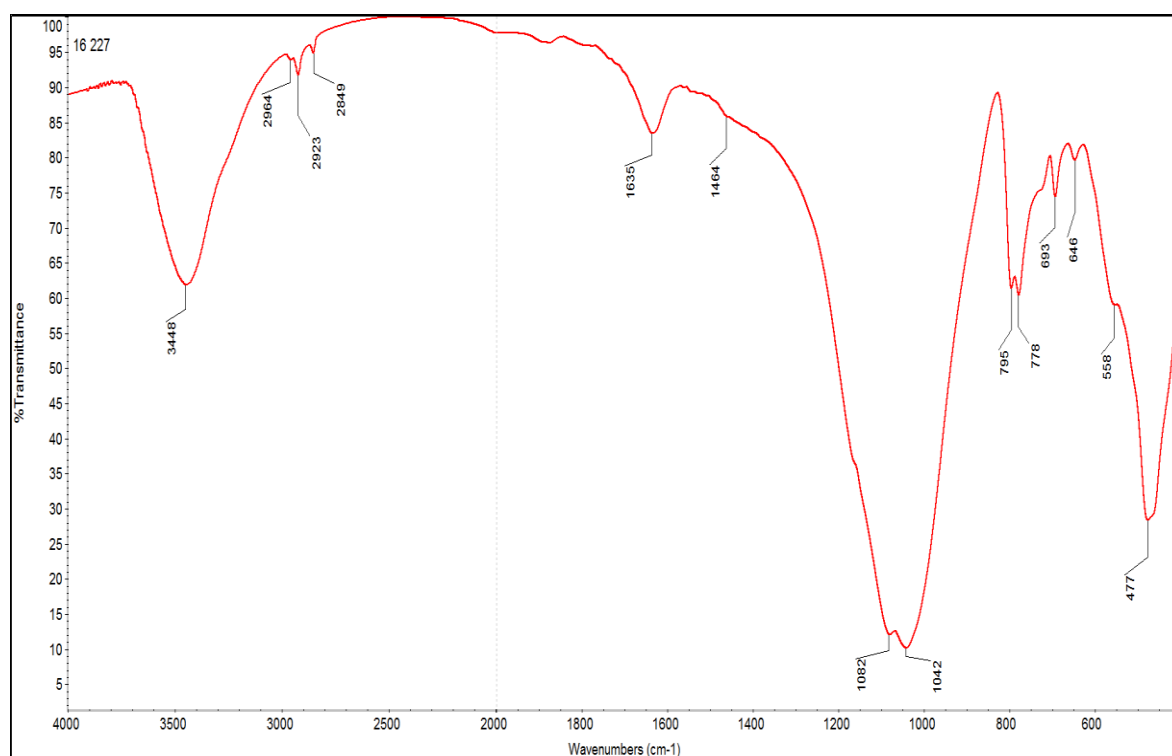
Příloha 2: Infračervené spektrum vzorku 16 225 (Cihlářská hlína)



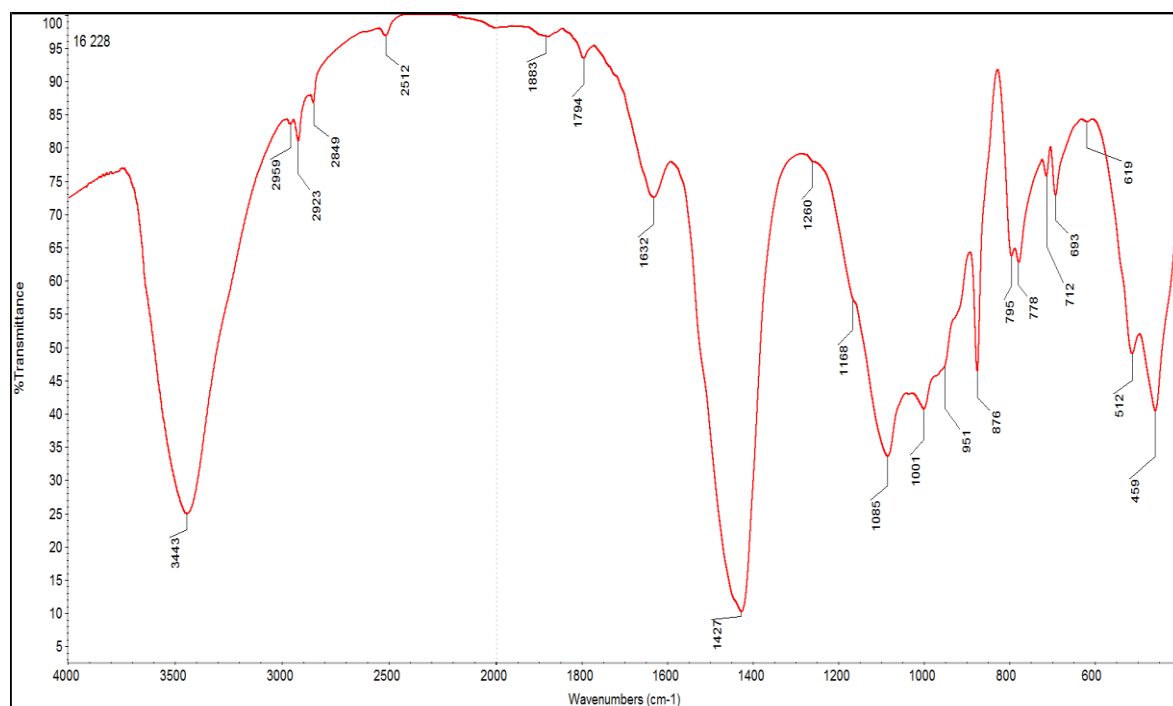
Příloha 3: Infračervené spektrum vzorku 16 226 (Cihlářská hlina vyžíhaná při 600 °C)



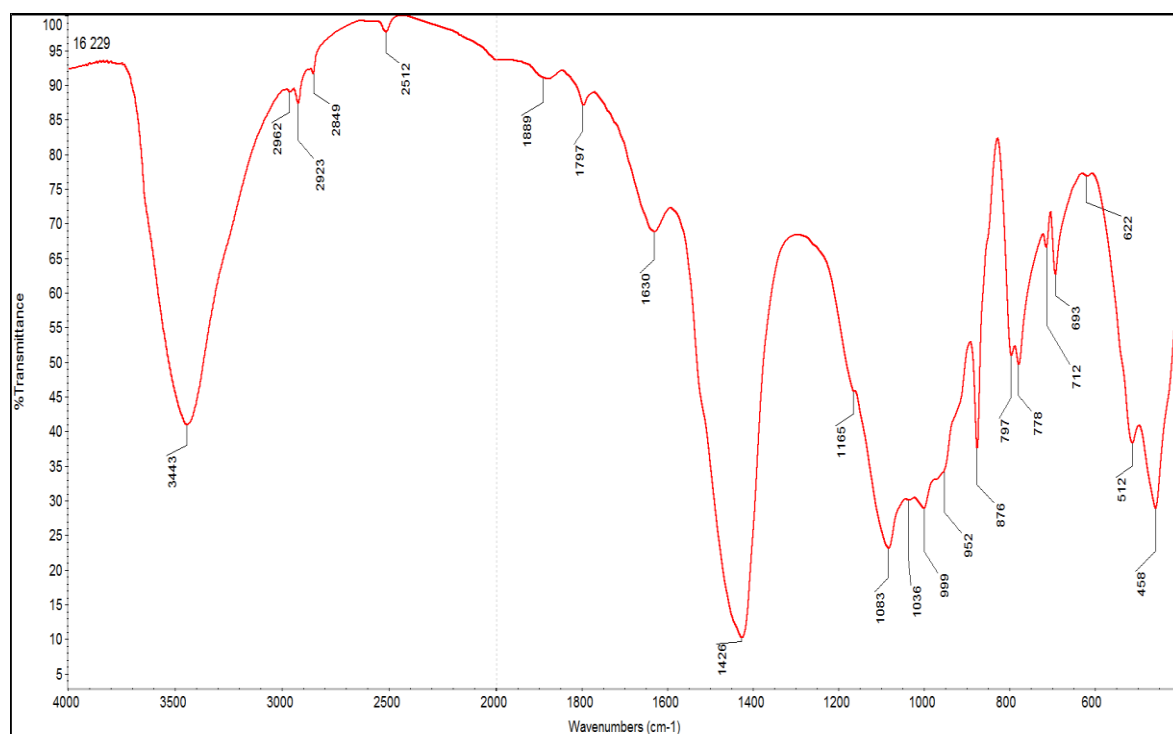
Příloha 4: Infračervené spektrum vzorku 16 227 (Cihlářská hlina vyžíhaná při 850 °C)



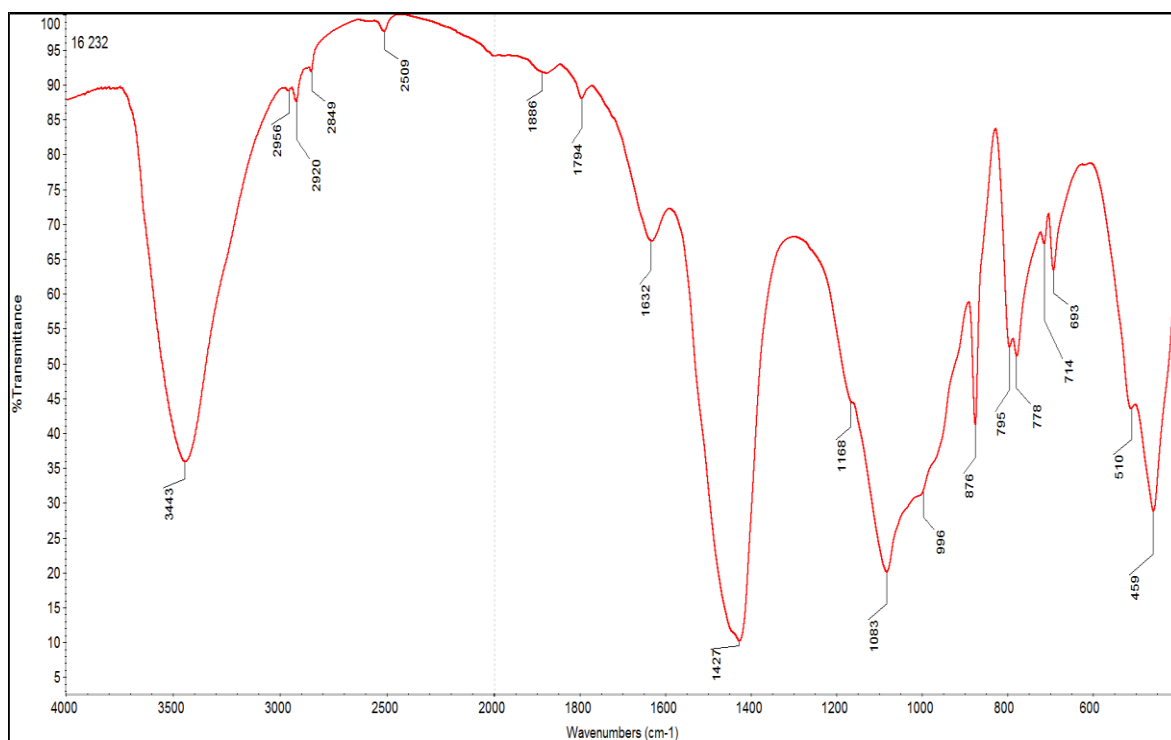
Příloha 5: Infračervené spektrum vzorku 16 228 (Hydratovaný RC)



Příloha 6: Infračervené spektrum vzorku 16 229 (Hydratovaný RC + cihlářská hlina 600°C)



Příloha 7: Infračervené spektrum vzorku 16 232 (Hydratovaný RC + 20% popílek)



..

Příloha 8: Infračervené spektrum vzorku 16 233 (Hydratovaný RC + antuka)

